UNIVERSIDADE DE ÉVORA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA RURAL

MESTRADO EM ENGENHARIA DO SOLO E DA ÁGUA

CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO DE CHEIAS RECORRENDO A UM MODELO DISTRIBUÍDO

Rui Miguel Madeira Lança

Dissertação apresentada à Universidade de Évora para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Solo e da Água

Orientador: Prof. Doutor António Carmona Rodrigues,

Universidade Nova de Lisboa

Faro, Fevereiro de 2000

UNIVERSIDADE DE ÉVORA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA RURAL

MESTRADO EM ENGENHARIA DO SOLO E DA ÁGUA

CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO DE CHEIAS RECORRENDO A UM MODELO DISTRIBUÍDO

Rui Miguel Madeira Lança

Dissertação apresentada à Universidade de Évora para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Solo e da Água

Orientador: Prof. Doutor António Carmona Rodrigues,

Universidade Nova de Lisboa

Faro, Fevereiro de 2000

Agradecimentos

O autor deseja apresentar os seus agradecimentos a todas as pessoas e entidades/instituições que, de algum modo contribuíram para a elaboração deste trabalho.

Em particular gostaria de agradecer:

- Ao Professor Doutor António Carmona Rodrigues pela sua disponibilidade e prontidão na orientação deste trabalho;

- Ao Eng. José Luís Teixeira da Costa, da Universidade do Algarve, Escola Superior de Tecnologia pelos seus conselhos práticos e apoio dado durante a realização deste trabalho;

- Ao Instituto da Água (INAG), em especial à Engª Cláudia Brandão, pela disponibilização dos dados de campo, necessários à aferição deste trabalho;

- Á Direcção Regional do Ambiente do Algarve (DRAA), em especial ao Sr. Cláudio pela sua prontidão em me disponibilizar os dados da estação meteorológica de São Brás de Alportel;

- Aos meus pais pelo incentivo e apoio incondicional que sempre demonstraram.

Resumo

O presente trabalho visa fundamentalmente apresentar uma contribuição para o estudo de cheias em bacias hidrográficas.

O estudo e compreensão dos fenómenos que provocam uma cheia é fundamental para a segurança das populações e dos bens que se encontram em zonas ciclicamente inundáveis. Estes locais são preferenciais para a fixação de população, tanto pela via de comunicação fluvial, como pela fertilidade dos solos aluvionares.

O aspecto mais relevante deste trabalho consiste em apresentar um modelo de precipitação/escoamento superficial que toma em consideração o fenómeno distribuído em toda a área da bacia, sendo a metodologia válida para todos os pontos da bacia, encosta ou linha de água, conseguindo prever quais as modificações induzidas na relação precipitação/escoamento superficial devido a modificações na bacia. Possibilitando uma abordagem de controlo de cheias, não pela intervenção no leito como é usual, mas pelo reordenamento da bacia, práticas de conservação do solo e alteração do seu uso.

O modelo baseia-se em equações físicas para modelar os fenómenos da infiltração e do escoamento superficial.

Para modelar o escoamento superficial o modelo desenvolvido emprega a equação da onda cinemática. Esta equação é resolvida por dois métodos numéricos distintos, por forma a detectar acumulação de erros e problemas de convergência.

A rede hidrográfica é alimentada por caudais de percurso que são determinados pelo excesso de precipitação, numa visão do escoamento superficial descrita por Horton, 1933. O excesso de precipitação é função da intensidade de precipitação e das características do solo. A modelação da infiltração é efectuada por dois métodos distintos, a equação de Green-Ampt e o método da Curva Número do Soil Conservation Service, por forma a que os resultados possam ser controlados e aferidos mais facilmente.

O modelo desenvolvido é aplicado à bacia hidrográfica da Ribeira de Alportel, exemplo que serve para aferir os dados por retro-análise, comparando os resultados obtidos pela simulação com os valores de campo observados na estação hidrométrica de Bodega. Deste modo, é possível prever para possíveis cenários de alteração das condições da bacia hidrográfica qual a futura resposta da ribeira a eventos meteorológicos.

Abstract

The aim of this work is to give a contribute to the study of watersheds flood hydrographs.

The study and comprehension of the processes involved in a flood is of fundamental interest to the population safety and goods that are located in places which are frequently flooded. Normally, these places have a very high population density because they have water nearby. The river is a good communication way and the soils are fertile.

The most relevant aspect of this study is the presentation of one precipitation/runoff model, that deals with the process in all watershed area, which is able to predict and relate changes in the precipitation/runoff relation due to modification on soil use. This can be used in flood control works not by the intervention in the main channel, as it is usual, but by reordering the watershed, soil conservation practices and changes of soil use.

The deterministic distributed model developed uses the kinematic wave equation to compute flood routing. This equation is solved by two distinct numerical methods. This technique is a way to detect the accumulation of errors and convergence problems.

The hydrographic network is supplied by distributed inflow, which is calculated by the precipitation excess, in a vision of runoff generation described by Horton, 1933. The precipitation excess depends of the rainfall hyetograph and soil properties and its use. The infiltration is computed by two distinct methods, the Green-Ampt equation and the Soil Conservation Service Curve Number method, so that the results can be compared and controlled easier.

The developed model is applied to the Ribeira de Alportel watershed, where by comparing the computed results with the observed ones in Bodega's level gage station, some soil data is calibrated by back-analysis. With this data the model is able to determinate the response of the watershed due a predicted rainfall.

Símbologia

No desenvolvimento do texto é referido o significado de todas as variáveis, contudo considera-se conveniente apresentar a lista das variáveis envolvidas neste estudo e respectivos significados.

variável	**significado**
A	área da bacia hidrográfica;
A	área da secção transversal do escoamento;
a	aceleração;
$\boldsymbol{a}$	parâmetro da equação da onda cinemática;
AMC	condição antecedente de humidade do solo, "*Antecedent Moisture Condition AMC*";
$\boldsymbol{a}_1$	ângulo formado entre a vertical e a margem esquerda;
α_2	ângulo formado entre a vertical e a margem direita;
B	largura superficial do escoamento;
b	largura do rasto do leito;
$\boldsymbol{b}$	parâmetro da equação da onda cinemática;
$\boldsymbol{b}$	factor de correcção da quantidade de movimento ou coeficiente de Boussinesq;
C_f	coeficiente da tensão tangencial entre o fluido e o ar;
C_{max}	cota máxima da bacia hidrográfica;
CN	número de escoamento;
c_k	celeridade da onda cinemática;
C_d	celeridade da onda dinâmica;
D_d	densidade de drenagem;
dx	comprimento do volume de controlo;
d	distância;
$\boldsymbol{D}t$	intervalo de tempo;
$\boldsymbol{D}x$	incremento da distância segundo x;
$\Delta\boldsymbol{q}$	variação do teor volumétrico de humidade;
E	comprimento da linha de água principal;

E_c	energia cinética;
$E_{calculo}$	comprimento da linha de água principal obtido pelo somatório dos comprimentos dos troços que definem essa linha de água na rede hidrográfica de cálculo;
E_{real}	comprimento da linha de água principal, obtido por medição sobre a cartografia base;
F	força;
F_a	precipitação retida após o escoamento superficial se iniciar;
$F(t)$	função infiltração acumulada;
F_e	força de contracção ou expansão causada por variações bruscas da geometria do canal;
F_g	força gravítica;
F_f	força de atrito com o fundo e laterais do volume de controlo;
F_w	força do vento na superfície do fluido;
F_p	força devida à de pressão;
F_{pm}	resultante da pressão hidrostática actuante na secção de montante;
F_{pj}	resultante da pressão hidrostática actuante na secção de jusante;
F_{pl}	resultante da pressão hidrostática segundo a direcção do escoamento nas laterais do volume de controlo;
F_{SA}	factor de sinuosidade adicional;
f	taxa de infiltração;
g	aceleração da gravidade;
$g(t)$	resposta de um sistema linear à entrada de um caudal unitário e constante;
g	peso volúmico;
h	cota da superfície livre do escoamento medida a partir do leito;
h_0	altura da lâmina de água acima da superfície do solo;

$h(t)$	resposta de um sistema linear à entrada de um volume unitário num intervalo de tempo Dt no sistema;
$\boldsymbol{h}$	porosidade;
I	caudal que entra no sistema hidrológico;
I_p	índice de pendente;
i	posição no espaço;
i	número da célula;
I_a	precipitação retida no solo antes do escoamento se iniciar;
ic	número do troço corrente da rede hidrográfica;
j	nível de tempo;
K	conductividade hidráulica;
K_e	factor de expansão ou contracção;
K_c	coeficiente de compacidade ou índice de Gravelius;
K_s	coeficiente de rugosidade de Manning-Strickler;
k_f	factor de forma;
k	constante de um sistema hidrológico linear;
L	comprimento do canal principal, estirão;
L	distância medida em linha recta entre a nascente e a foz;
L	lado maior do rectângulo equivalente;
L	profundidade da frente de humedecimento para um tempo t;
L_c	distância em km desde a secção de controlo até ao ponto localizado na linha de água principal mais próximo do centro de gravidade da bacia;
L_h	comprimento total das linhas de água;
L_{ic}	o comprimento real do troço ic;
l	lado menor do rectângulo equivalente;
m	massa;
m_1	tangente do ângulo formado entre a vertical e a margem esquerda;

m_2	tangente do ângulo formado entre a vertical e a margem direita;
N_1	número do nó de montante;
N_2	número do nó de jusante do troço *ic*;
nc	número do último troço da rede que representa o troço onde se encontra a estação hidrométrica.
Ordem	número de ordem;
$\boldsymbol{\grave{U}}$	traduz a estrutura de um modelo hidrológico;
P	perímetro molhado da secção transversal do escoamento;
P	perímetro da bacia hidrográfica;
P	precipitação total;
P_e	precipitação efectiva;
$p_{i,j}$	precipitação na célula *i*, no tempo *j*;
p_{kj}	precipitação na estação *k*, no tempo *j*;
Q	caudal;
Q	caudal que sai do sistema hidrológico;
$(Q_1)_{ic}$	caudal a montante do troço ic;
$(Q_2)_{ic}$	caudal a jusante do troço ic;
q	caudal de percurso;
q	caudal infiltrado por unidade de área;
q_p	caudal de pico;
$\boldsymbol{q}_i$	teor de humidade volumétrico inicial;
$\boldsymbol{q}_r$	teor de humidade volumétrico residual;
$\boldsymbol{q}_e$	teor de humidade volumétrico efectivo;
$\boldsymbol{q}$	ângulo formado entre a horizontal e o perfil longitudinal do leito;
R	raio hidráulico;
$\boldsymbol{r}$	massa volúmica da água;
S	função de armazenamento de um reservatório linear;

S	retenção máxima por infiltração ou estagnação em pequenas depressões do solo;
S_f	declive da linha de energia.
S_0	declive do perfil longitudinal do leito;
S_e	perda de carga devida à expansão ou contracção;
S_1	declividade entre a nascente e a foz;
S_2	declividade média;
S_3	declividade equivalente constante;
T_c	tempo de concentração;
t	tempo;
t_{cel}	tempo de concentração da célula *cel*.
t_{iso}	tempo correspondente à isócrona se está a determinar;
t_{ic}	tempo que a onda leva a percorrer a distância x_{ic}.
t_p	tempo de ascensão do hidrograma;
t_r	tempo de duração da chuva;
$\boldsymbol{t}_w$	esforço de corte entre o ar e a superfície livre do volume de controlo;
$\boldsymbol{t}_0$	tensão tangencial ou de arrastamento;
$\boldsymbol{t}$	variável de integração, representa o instante onde ocorre o impulso;
U	velocidade média do escoamento;
$u()$	resposta de um sistema linear a um caudal unitário que entra instantaneamente no sistema;
V	velocidade do escoamento;
V	volume de água no interior do volume de controlo;
V_r	velocidade relativa entre o fluido e o ar;
U	velocidade média do escoamento;
$\boldsymbol{n}$	ângulo formado entre a direcção do vento e a direcção do escoamento;
x	posição medida no sentido longitudinal do leito;

x	distância medida segundo o perfil longitudinal;
x_{ic}	distância percorrida ao longo do canal *ic*;
y	altura da lâmina de água;
$\mathcal{y}$	altura de sucção na frente de humedecimento;
z	profundidade no perfil;
z	cota do leito medida em relação a um nível de referência;

Índice de matérias

I - Introdução 1
I.1 - Generalidades 1
I.2 - Organização 2
II - Síntese de conhecimentos 5
II.1 - Breve história do desenvolvimento dos modelos de precipitação/escoamento superficial 7
II.2 - Modelos deterministicos agregados 10
II.2.1 - Modelo geral de um sistema hidrológico agregado 10
II.2.2 - Modelo de um sistema hidrológico linear 10
II.2.3 - Método de Muskingum 13
II.2.4 - Reservatórios lineares em série 15
II.2.5 - Hidrograma unitário 17
II.2.6 - Hidrograma unitário sintético 18
II.2.7 - Hidrograma unitário sintético de Snyder's 18
II.2.8 - Hidrograma adimensional do Soil Conservation Service 20
II.2.9 - Hidrograma unitário triangular do Soil Conservation Service 21
II.3 - Modelos deterministicos distribuídos 21
II.3.1 - Um método explicito para a resolução numérica das equações de Saint-Venant 23
II.3.2 - Método de Muskingum-Cunge 25
II.4 - Modelos estocásticos 26
II.5 - Definição das propriedades do terreno 26
III - Caudais de percurso 29
III.1 Precipitação 29
III.2 - Equações de infiltração 30
III.2.1 - Equação de Green-Ampt 31
III.2.1.1 - Exemplo de utilização da equação de Green-Ampt 37
III.2.1.1.3 - Método da Curva Número do Soil Conservation Service 38
III.2.2.1 - Exemplo de utilização do método da curva número 43

III.3 - Caudais de percurso 45
IV - Equações de Saint-Venant 47
IV.1. Equação da continuidade 47
IV.2. Equação da conservação da quantidade de movimento 50
V - Modelo de onda cinemática 59
V.1 - Equações do modelo de onda cinemática 59
V.2 - Celeridade da onda cinemática 60
V.3. Resolução numérica da equação de onda cinemática 62
V.3.1 - Método linear 65
V.3.2 - Método não linear 67
V.4 - Condição de estabilidade de Courant 69
VI - Modelo 'QUASI 2D' 71
VI.1 - Factor de sinuosidade adicional 77
VI.2 - Coeficiente de rugosidade de Manning-Strickler (Ks) 79
VI.3 - Aplicação do modelo de onda cinemática na rede hidrográfica 80
VI.3.1 - Método linear 81
VI.3.2. Método não linear 82
VI.4 - Cálculo da altura do escoamento 82
VI.4.1 - Secção trapezoidal assimétrica 82
VI.4.2 - Secção rectangular 84
VI.5 - Cálculo das isócronas 85
VI.5.1 - Cálculo da celeridade da onda cinemática 86
VI.5.2 - Cálculo do tempo de propagação do escoamento 87
VI.6 - Considerações sobre o cálculo 87
VII - Caracterização da bacia hidrográfica da Ribeira de Alportel 89
VII.1 - Localização 89
VII.2 - Geomorfologia da bacia 90
VII.2.15 - Coeficientes de rugosidade de Manning-Strickler 91
VII.3 - Rede hidrográfica 92
VII.4 - Precipitação 94
VII.5 - Pedologia 95

VII.6 - Usos do solo 96
VII.7. Classes de infiltração 101
VII.8 - Tempo de concentração da bacia hidrográfica 104
VII.8.1 - Fórmula de Kirpich 104
VII.8.2 - Fórmula de Ven Te Chow 104
VII.8.4 - Fórmula de Picking 105
VII.8.5 - Fórmula de Temez 105
VII.9 - Fotos da bacia hidrográfica 106
VIII - Aplicação do modelo à bacia hidrográfica da Ribeira de Alportel 111
VIII.1 - Cenário 1 - chuva efectiva uniforme, constante e de longa duração 113
VIII.1.1 - Áreas de contribuição 115
VIII.1.2 - Constância do tempo de concentração 116
VIII.2 - Cenário 2 - Escoamento de 9 a 14 de Dezembro de 1995 117
VIII.1.3 - Cenário III - Cálculo de hidrogramas de cheias para vários períodos de retorno com base em curvas IDF 124
IX - Conclusões 131
IX.1 - Restrições 133
IX.2 - Futuras linhas de desenvolvimento 134
Bibliografia 137

Índice de figuras

Figura II.2.2.1 - Resposta de um reservatório linear a um impulso unitário 12

Figura II.2.2.2 - Resposta de um reservatório linear a dois impulsos 12

Figura II.2.2.3 - Resposta de um reservatório linear à entrada de um caudal unitário 12

Figura II.2.2.4 - Resposta de um reservatório linear à entrada de um volume unitário num intervalo Δt 13

Figura II.2.3.1 - Progressão e recessão de uma onda de cheia 14

Figura II.2.4.1 - Reservatórios lineares em série 16

Figura II.2.7.1 - Hidrograma unitário sintético de Snyder's 20

Figura II.2.8.1 - Hidrograma unitário sintético adimensional do SCS 20

Figura II.2.9.1 - Hidrograma unitário sintético triangular do SCS 21

Figura II.3.1.1 - Discretização do continuo espaço tempo 23

Figura 2.5.1 - Modelos digitais do relevo:
a) Malha regular de células;
b) malha triangular irregular;
c) isolinhas de altitude. 27

Figura II.5.2 - Estruturação funcional do programa HEC-HMS 28

Figura III.1.1 - Distâncias às estações meteorológicas 29

Figura III.2.1 - Avanço de uma frente de humedecimento 31

Figura III.2.1.1 - Avanço de uma frente de humedecimento no modelo de Green-Ampt 31

Figura III.2.1.2 - Infiltração numa coluna de solo 33

Figura III.2.1.3 - Ábaco triangular para classificação textural (SCS) 36

Figura III.2.1.1.1 - Precipitação/Precipitação efectiva por Green-Ampt 37

Figura III.2.1.1.2 - Taxa de precipitação / taxa de infiltração potencial / taxa de infiltração real 37

Figura III.2.1.6 - Precipitação acumulada / infiltração acumulada 38

Figura III.2.2.1 - Ábaco das curvas numero (SCS) 39

Figura III.2.2.2 - Ábaco triangular para a classificação do grupo hidrológico de solo 41

Figura III.2.2.3 - Precipitação / precipitação efectiva pela curva numero 44

Figura III.2.2.4 - Taxa de precipitação / taxa de infiltração..... 44
Figura III.2.2.5 - Precipitação acumulada / infiltração acumulada..... 44
Figura IV.1.1 - Volume de controlo (Perfil longitudinal)..... 48
Figura IV.1.2 - Volume de controlo (Planta)..... 48
Figura IV.1.3 - Volume de controlo (Perfil transversal) 48
Figura V.2.1 - Hidrograma de entrada 62
Figura V.2.2 - Curva característica 62
Figura V.2.3 - Hidrograma de saída 62
Figura V.3.1 - Grelha numérica discretizando o plano espaço-tempo..... 63
Figura V.3.1.1 - Operador numérico linear..... 66
Figura V.3.2.1 - Esquema de uma iteração do método de Newton - Raphson..... 68
Figura VI.1 - Modelo digital do terreno 71
Figura VI.2 - Discretização da bacia hidrográfica em células 71
Figura VI.3 - Possíveis direcções do escoamento 72
Figura VI.4 - Discretização da rede hidrográfica..... 72
Figura VI.5 - Fluxograma da sub-rotina GeraRedeHidrográfica..... 74
Figura VI.7 - Secção transversal..... 75
Figura VI.8 - Definição da secção transversal..... 75
Figura VI.1.1 - Factor de sinuosidade adicional..... 78
Figura VI.3.1 - Representação esquemática da estrutura de dados..... 80
Figura VI.3.2 - Representação esquemática da estrutura dos dados (pormenor)..... 81
Figura VI.4.1 - Secção trapezoidal assimétrica 82
Figura VI.4.2.1 - Secção rectangular..... 84
Figura VII.1.1 - Localização da bacia hidrográfica da Ribeira de Alportel em Portugal Continental..... 89
Figura VII.1.2 - Localização da bacia hidrográfica da Ribeira de Alportel no Sotavento Algarvio 90
Figura VII.2.1 - Modelo digital do relevo da bacia hidrográfica da Ribeira de Alportel..... 90
Figura VII.2.2 - Curva hipsométrica da bacia hidrográfica da Ribeira de Alportel..... 91
Figura VII.3.1 - Rede hidrográfica da bacia hidrográfica da Ribeira de Alportel..... 92

Figura VII.3.2 - Perfil longitudinal da linha de água principal 93
Figura VII.3.3 - Geometria da secção de controlo da estação hidrométrica de Bodega 93
Quadro VII.3.2 - Localização da estação hidrométrica de Bodega 94
Figura VII.5.1 - Classes taxonómicas do solo da bacia hidrográfica da Ribeira de Alportel 95
Figura VII.6.1 - Classes de uso do solo 99
Figura VII.7.1 - Classes de infiltração 101
Fotografia VII.9.1 - Cabeceira da Ribeira de Alportel 106
Fotografia VII.9.2 - Aspecto de uma zona de cabeceira 106
Fotografia VII.9.3 - Início de uma linha de água 107
Fotografia VII.9.4 - Aspecto do uso do solo 107
Fotografia VII.9.5 - Leito da Ribeira de Alportel 108
Fotografia VII.9.6 - Leito na secção de controlo 108
Fotografia VII.9.7 - Estação hidrométrica de Bodega 109
Figura VIII.1 - Discretização da rede hidrográfica da Ribeira de Alportel 112
Células de 200x200 m 112
Figura VIII.2 - Discretização da rede hidrográfica da Ribeira de Alportel 112
Células de 400x400 m 112
Figura VIII.1.1 - Hidrogramas na secção de controlo - dimensão da célula 200x200 114
Figura VIII.1.2 - Hidrogramas na secção de controlo - dimensão da célula 400x400 115
Figura VIII.1.1.1 - Áreas de contribuição 116
Figura VIII.1.2.1 - Hidrogramas na secção de controlo (Pe = 2, 5, 10 e 20 mm/hora) 117
Figura VIII.1.2.1 - Precipitação horária observada nas estações udográficas 118
Figura VIII.1.2.2 - Hidrograma observado na estação hidrométrica de Bodega 118
Figura VIII.1.2.3 - Localização das células utilizadas para controlo de resultados 120
Figura VIII.1.2.4 - Hietograma de precipitação/precipitação efectiva horária - célula 2476 120
Figura VIII.1.2.5 - Hietograma de precipitação/precipitação efectiva horária - célula 2766 120
Figura VIII.1.2.6 - Hietograma de precipitação/precipitação efectiva horária - célula 3342 121

Figura VIII.1.2.7 - Hietograma de precipitação/precipitação efectiva horária - célula 4726 121
Figura VIII.1.2.8 - Hietograma de precipitação/precipitação efectiva horária - célula 5785 121
Figura VIII.1.2.9 - Hidrogramas calculados e observados na estação hidrométrica de Bodega - célula 6230..... 122
Figura VIII.1.2.10 - Hidrogramas calculados - célula 3820..... 123
Figura VIII.1.2.10 - Hidrogramas calculados - célula 4060..... 123
Figura VIII.1.2.10 - Hidrogramas calculados - célula 4608..... 123
Figura VIII.1.2.10 - Hidrogramas calculados - célula 4939..... 124
Figura VIII.1.3.1 - Curvas IDF para São Brás de Alportel..... 124
Figura VIII.1.3.2 - Hidrogramas de cheia para períodos de retorno de 50, 100, 500 e 1000 anos - célula 6230 125
Figura VIII.1.3.3 - Hidrogramas de cheia para períodos de retorno de 50, 100, 500 e 1000 anos - célula 3820 125
Figura VIII.1.3.4 - Hidrogramas de cheia para períodos de retorno de 50, 100, 500 e 1000 anos - célula 4060 125
Figura VIII.1.3.5 - Hidrogramas de cheia para períodos de retorno de 50, 100, 500 e 1000 anos - célula 4608 126
Figura VIII.1.3.6 - Hidrogramas de cheia para períodos de retorno de 50, 100, 500 e 1000 anos - célula 4939 126
Figura VIII.1.3.6 - Divisão da bacia hidrográfica em três zonas de precipitação..... 127
Figura VIII.1.3.7 - Hidrogramas de cheia para períodos de retorno de 50, 100, 500 e 1000 anos precipitação por zona - célula 6230 127
Figura VIII.1.3.8 - Hidrogramas de cheia para períodos de retorno de 50, 100, 500 e 1000 anos precipitação por zona - célula 3820 127
Figura VIII.1.3.9 - Hidrogramas de cheia para períodos de retorno de 50, 100, 500 e 1000 anos precipitação por zona - célula 4060 128
Figura VIII.1.3.10 - Hidrogramas de cheia para períodos de retorno de 50, 100, 500 e 1000 anos precipitação por zona - célula 4608 128
Figura VIII.1.3.11 - Hidrogramas de cheia para períodos de retorno de

50, 100, 500 e 1000 anos precipitação por zona - célula 4939 128

Figura IX.1 - Alimentação de uma linha de água 134

Índice de quadros

Quadro III.2.1.1 - Parâmetros para a equação de Green-Ampt 35
Quadro III.2.2.1 - Grupos de solo segundo o SCS 40
Quadro III.2.2.2 - Classificação do CN (SCS) 42
Quadro VI.1 - Dados da rede hidrográfica discretizada 77
Quadro VII.2.1 - Parâmetros descritivos da geomorfologia da bacia hidrográfica da Ribeira de Alportel..... 91
Quadro VII.3.1 - Parâmetros descritivos da linha de água principal..... 93
Quadro VII.4.7.1 - Localização das estações meteorológicas 94
Quadro VII.4.7.2 - Curvas IDF 95
Quadro VII.5.1 - Classes taxonómicas do solo bacia hidrográfica da Ribeira de Alportel..... 96
Quadro VII.5.2 - Áreas das classes taxonómica do solo 96
Quadro VII.5.3 - Textura dos horizontes das classes taxonómicas 97
Quadro VII.5.4 - Parâmetros das classes taxonómicas 98
Quadro VII.6.1 - Usos do solo 100
Quadro VII.6.2 - Áreas das classes de uso do solo 100
Quadro VII.7.1 - Áreas das classes de infiltração 102
Quadro VII.7.2 - Propriedades das classes de infiltração..... 103
Quadro VII.8.1 - Quadro resumo dos tempos de concentração..... 105

I - Introdução

I.1 - Generalidades

Com o desenvolvimento computacional, é actualmente possível efectuar operações complexas em minutos, que apenas há alguns anos atrás levariam semanas a processar.

Assim, actualmente, já é possível implementar modelos hidrológicos distribuídos que se baseiam na resolução numérica das equações gerais do escoamento com superfície livre, discretizando o meio em milhares de pontos por forma a representar da forma mais fiel a variabilidade espacial e temporal da realidade.

Ao criar um modelo distribuído do escoamento superficial de uma bacia hidrográfica é necessário definir as características que influenciam o fenómeno. Estas características, tais como a topografia, o material do leito das linhas de água, os solos, ou os usos do solo, são propriedades espacialmente distribuídas e geograficamente referenciáveis, levando ao domínio dos sistemas de informação geográfica, SIG.

No presente trabalho não se utilizou nenhum programa comercial de SIG, sendo a implementação do modelo sido programada de raiz pelo autor.

A informação sobre as propriedades espacialmente distribuídas é organizada num modelo digital do terreno constituído por uma malha de células regulares, o que permite uma boa eficiência de cálculo no algoritmo de geração rede hidrográfica e no modelo do escoamento superficial, Palacios-Vélez, 1986 e Cuevas-Renauld, 1992 em Silva 1996.

Por constituir uma boa aproximação das equações gerais do escoamento em superfície livre e pela estabilidade dos métodos numéricos para a sua resolução, recorreu-se ao modelo de onda cinemática. para modelar o comportamento do escoamento em superfície livre gradualmente variado na rede hidrográfica (Silva, 1996).

Os caudais de percurso que alimentam a rede hidrográfica devido ao excesso de precipitação, Horton, 1933, são determinados com base na equação de Green-Ampt, o que constitui uma boa aproximação e tem demonstrado bons resultados em modelos consagrados como o WEPP (Flanagan, 1995). O excesso de precipitação também é determinado com base no método da Curva Número, *CN*, do Soil Conservation Service por forma a servir de termo de comparação com os resultados do método anterior.

I.2 - Organização

O presente trabalho divide-se em quatro partes perfazendo um total de nove capítulos e dois anexos.

A primeira parte é constituída pelos capítulos I e II e nela se faz a apresentação do presente trabalho, os seus objectivos e a sua inserção no estado actual do conhecimento.

A segunda parte é constituída pelos capítulos III, IV, V e VI. Visa a apresentação e dedução das equações base utilizadas pelo modelo, bem como a justificação das constatações, pressupostos e simplificações que ditaram a sua forma.

À terceira parte pertencem os capítulos VII e VIII. A metodologia apresentada na segunda parte é aplicada a um caso prático. Apresenta-se a caracterização hidrológica da bacia hidrográfica da Ribeira de Alportel. Os dados utilizados pelo modelo, bem como os resultados que se obtiveram mediante os vários cenários considerados também são apresentados nesta parte.

Por fim no capítulo IX referem-se as conclusões sobre o trabalho efectuado e tecem-se considerações sobre linhas de investigação futuras.

São incluídos dois anexos, um dos quais é o manual do utilizador do modelo e o outro é o código do programa.

O capitulo I tem por objectivo apresentar o trabalho ao leitor o tema do trabalho, a organização do mesmo e justificar a utilidade do mesmo.

No capítulo II é feita uma síntese de conhecimentos onde se refere a história do desenvolvimento dos modelos de precipitação/escoamento e se apresenta sumariamente alguns modelos do escoamento superficial.

O capítulo III apresenta a forma como os dados da precipitação são tratados e como é feita a sua distribuição espacial. Introduz o fenómeno da infiltração e são deduzidos dois métodos para a simular. A equação de Green-Ampt e o método da Curva Número do Soil

Conservation Service, SCS. Também se indica como se determinaram e se aferiram as propriedades das classes de infiltração.

No capitulo IV são deduzidas as equações gerais do escoamento em superfície livre, a equação da conservação da massa e a equação da conservação da quantidade de movimento e quais os seus pressupostos e simplificações. Estas equações designam-se por equações de S. Venant e formam o modelo de onda dinâmica. São ainda indicadas quais as simplificações que levam ao modelo de inércia nula e ao modelo de onda cinemática.

No capítulo V apresenta-se o modelo de onda cinemática, bem como os métodos numéricos empregues para a sua resolução numérica.

No capitulo VI descreve-se o método empregue para gerar a rede hidrográfica com base no modelo digital do terreno e a aplicação do modelo de onda cinemática nessa rede, bem como a organização da estrutura de dados para a implementação do esquema numérico para a resolução da equação da onda cinemática na rede hidrográfica, formando um modelo Quasi-2D.

No capítulo VII é feita a caracterização hidrológica da bacia hidrográfica da Ribeira de Alportel.

No capítulo VIII é aplicado o modelo desenvolvido ao caso de estudo, são apresentados e comentados os resultados obtidos para os vários cenários considerados.

Por fim, no capítulo IX, são tecidas algumas considerações gerais, indicando-se os aspectos mais marcantes e relevantes do estudo e apontam-se as linhas de investigação a seguir no futuro para continuar o aprofundamento do tema.

São incluídos dois anexos, o anexo A contem o manual do utilizador do programa desenvolvido no âmbito deste estudo e o anexo B inclui o código fonte do programa.

II - Síntese de conhecimentos

O ciclo hidrológico envolve fenómenos complexos cuja modelação matemática exacta se torna impossível, devido à própria natureza dos fenómenos e à dificuldade na aquisição de dados.

Na impossibilidade de modelar o ciclo hidrológico de forma exacta, este pode ser representado de forma aproximada por um sistema conceptual. Este sistema é constituído por subsistemas como a água atmosférica, a água superficial e a água subterrânea. Cada um destes subsistemas possui vários processos. Assim o subsistema que representa a água atmosférica possui a precipitação, evaporação, intercepção e transpiração. O subsistema da água superficial contem os processos de intercepção e escoamento superficial. Por último o subsistema constituído pelas águas subterrâneas possui os processos de infiltração, recarga de aquíferos, escoamentos sub-superficial e subterrâneo.

Na grande maioria dos problemas práticos não é necessário modelar o ciclo hidrológico na sua totalidade, mas apenas uma fracção deste. Deste modo podemos definir um sistema hidrológico como uma estrutura ou um volume no espaço, delimitado por uma fronteira, por onde entram e saem água, ar e energia térmica sob diferentes formas.

A análise de um sistema hidrológico tem como objectivo estudar e compreender o funcionamento do sistema por forma a determinar as suas respostas. O modelo de um sistema hidrológico é uma aproximação do sistema real, as suas entradas e saídas são variáveis mensuráveis e a sua estrutura é um conjunto de equações que relacionam as entradas com as saídas. Como as entradas e as saídas são função do espaço e do tempo, podemos escrever:

$$Q(x,y,z,t) = \Omega \cdot I(x,y,z,t) \qquad \text{(II.1)}$$

em que:

- Ω traduz a estrutura do modelo;
- Q caudal que sai do sistema hidrológico;
- I caudal que entra no sistema hidrológico.

Os modelos hidrológicos podem ser divididos em duas categorias, os modelos físicos e os modelos abstractos. Os modelos físicos são modelos em escala reduzida, protótipos que traduzem o funcionamento do sistema real.

Os modelos abstractos representam o sistema através da matemática. O funcionamento do sistema é traduzido por um conjunto de equações que relacionam as variáveis de entrada com as variáveis de saída. Estas variáveis podem ser funções do espaço e do tempo e podem também ser probabilísticas ou aleatórias sendo descritas por distribuições estatísticas.

Um modelo determinístico não considera aleatóriedade, para um determinado conjunto de variáveis de entrada corresponde sempre um mesmo conjunto de variáveis de saída. Um modelo diz-se estocástico se considera alguma aleatóriedade no sistema.

Todos os sistemas hidrológicos envolvem alguma aleatóriedade, contudo se a variabilidade das variáveis de saída é pequena quando comparada com variabilidade de factores conhecidos, os modelos deterministicos são apropriados. Se o sistema real apresenta grande variabilidade das variáveis de saída para as mesmas variáveis de entrada, nesta situação a utilização de um modelo estocástico é mais indicada.

Um sistema hidrológico desenvolve-se em três dimensões no espaço, mas por simplificação, ao elaborar um modelo desse sistema podemos eliminar uma, duas ou mesmo as três dimensões dando origem a um modelo determinístico agregado. Num modelo determinístico agregado são consideradas médias das variáveis espacialmente distribuídas, reduzindo o modelo a um ponto no espaço em que só se considera a variação temporal. Pelo contrário um modelo determinístico distribuído considera o processo hidrológico a ocorrer em vários pontos do espaço, sendo as variáveis de saída e de entrada função do tempo e do espaço.

Os modelos estocásticos são classificados como independentes do espaço ou correlacionados com o espaço conforme as variáveis aleatórias em diferentes pontos do espaço se influenciam mútuamente ou não.

Os modelos deterministicos ainda podem ser divididos em modelos de regime variável ou modelos de regime uniforme consoante o estado do regime de escoamento varia ou não com o tempo. As variáveis de saída de um modelo estocástico são sempre função do tempo, podendo ser classificados como independente do tempo ou correlacionado com o tempo. Um modelo estocástico independente do tempo representa uma sequência de eventos hidrologicos

que não se influenciam, enquanto um modelo estocástico correlacionado com o tempo representa uma sequência de eventos meteorológicos em que o evento seguinte é pelo menos parcialmente influenciado pelo evento anterior e possívelmente por outros na sequência temporal.

Todos os modelos hidrologicos são uma aproximação da realidade pelo que o resultado de um modelo nunca pode ser considerado como uma certeza. Um fenómeno hidrológico varia nas três dimensões do espaço e no tempo. Ainda se pode considerar uma quinta fonte de variação que é a aleatóriedade.

O modelo que se desenvolve no âmbito deste trabalho é um modelo deterministico distribuído que tem quatro fontes de variação, as três dimensões do espaço e o tempo. Em alguns cenários utilizam-se equações de chuvas da região para vários tempos de retorno, nesta situação considera-se a precipitação como uma variável aleatória em que por análise estatística se determina a relação intensidade/duração/frequência. Nesta situação o modelo considera todas as cinco possíveis fontes de variação do processo hidrológico.

No estado actual do conhecimento é possível tratar o escoamento superficial e a infiltração com base em modelos deterministicos, contudo a precipitação possui uma forte componente aleatória que a remete para o campo dos modelos estocásticos.

Contudo existem inúmeras outras possíveis abordagens, algumas mais simplificadas, outras mais elaboradas para lidar com o problema da relação precipitação/escoamento superficial. Algumas dessas possíveis abordagens são referidas nos tópicos seguintes.

II.1 - Breve história do desenvolvimento dos modelos de precipitação/escoamento superficial

Em 1932, L. K. Sherman apresentou o hidrograma unitário como um método para determinar o escoamento superficial para qualquer chuvada. O hidrograma unitário é definido como a resposta da bacia hidrográfica a uma precipitação efectiva unitária uniformemente distribuída e com intensidade constante num tempo unitário. Em 1938 após estudar bacias hidrográficas nas montanhas dos Apalaches nos Estados Unidos, Snyder propôs relações entre algumas das características do hidrograma unitário como o caudal de pico, o tempo de retardamento e o tempo base introduzindo um hidrograma unitário sintético. Em 1945, Clark

deu um avanço na teoria do hidrograma unitário e propôs um hidrograma unitário, ao qual são aplicadas duas transformações. Uma translação e uma passagem por um reservatório linear. A primeira traduz o tempo de viagem da onda de cheia e a segunda traduz a sua atenuação. Este modelo é agregado e baseia-se sómente em relações de tempo/caudal do hidrograma unitário. Em 1957, Nash propôs uma equação para o hidrograma unitário que é uma função gama e traduz a resposta de uma cascata de *n* reservatórios lineares idênticos a um impulso. Este modelo proposto por Nash não modela a bacia hidrográfica, mas sim um processo com o mesmo comportamento.

Mais recentemente vários autores têm desenvolvido modelos que têm em consideração a variabilidade espacial da bacia hidrográfica.

Em 1976, Pilgrim levou a cabo um estudo experimental numa pequena bacia hidrográfica em que mediu os caudais em várias secções e mediu também o tempo que bóias colocadas na linha de água levavam a chegar à secção final. Neste trabalho chegou à conclusão que para caudais médios e altos o tempo de viagem é praticamente constante. Este autor deu um contributo significativo para o estudo da linearidade e da não linearidade da modelação hidrologica do processo do escoamento superficial.

Em 1979, Rodriguez-Iturbe e Valdes deram um contributo para o estudo da relação entra as características geomorfologicas da bacia hidrográfica e a sua resposta em termos hidrológicos. Estes autores já consideram no seu estudo ordem das linhas de água, seus comprimentos e áreas de influência para descrever a geomorfologia do sistema. Estes autores definem o conceito de hidrograma unitário geomorfológico.

Mesa e Mifflin, 1986, Nadem, 1992 e Troch, 1994 apresentam metodologias similares por forma a ter em consideração a variabilidade espacial na modelação hidrológica da resposta da bacia a eventos meteorológicos. Nestes estudos os autores consideram a bacia hidrográfica como cascatas formando uma rede dentritica de reservatórios lineares que representam as encostas a drenarem para a rede hidrográfica, assim como a hierarquia de canais que formam a rede hidrográfica.

Mesa e Mifflin, 1986 utilizam uma equação de advecção-dispersão, também conhecida por equação da onda difusa ponderada por uma função normalizada da rede hidrográfica. Esta função foi definida como o número de linhas de água a uma determinada distância da secção de controlo a dividir pelo comprimento total de todos os canais da rede hidrográfica.

Para determinar os caudais afluentes à rede hidrográfica provindos das encostas, estes autores sugerem duas funções, uma que traduz o escoamento rápido e outra para o escoamento lento. As duas funções são ponderadas de acordo com a probabilidade de uma gota de água tomar o caminho lento ou o caminho rápido para a linha de água. Do ponto de vista físico, estas duas funções representam o escoamento superficial e o escoamento sub-superficial. Este modelo foi testado numa pequena sub-bacia do Mississipi.

Para a resposta da rede hidrográfica, Naden, 1992 sugere também uma solução de advecção-dispersão, mas ponderada por uma função standarderizada da rede hidrográfica. Esta função foi definida pelo autor como o número de linhas de água a uma determinada distância da secção de controlo a dividir pelo numero total de canais da rede hidrográfica.

Em 1994, Troch et. al. propoêm a mesma solução do que Mesa e Mifflin (1986), contudo para o calculo dos caudais afluentes à rede provindos da encosta, o autor sugere também uma equação de advecção-dispersão, aplicada ao escoamento na encosta, ponderado por uma função normalizada da encosta definida como a probabilidade de concentração do escoamento num determinado ponto da encosta a uma determinada distância da rede hidrográfica. Ao contrário de Mesa, Mifflin e Naden, Troch et al. não considera a parcela do escoamento lento.

Uma abordagem para considerar a parcela rápida e lenta de resposta da bacia hidrográfica a um evento meteorológico é apresentada por Littlewood, 1992 e Jakeman, 1994. No modelo apresentado por estes autores são considerados duas cascatas de reservatórios lineares em paralelo, uma representa a água superficial e a outra representa a água sub-superficial. O movimento da água superficial é mais rápido e afecta essencialmente a curva de ascensão do hidrograma, enquanto que o movimento da água sub-superficial afecta a curva de recessão e de esvaziamento do hidrograma.

Em 1996, Cárdenas, na sua tese de doutoramento apresenta um modelo distribuído, no qual discretiza a bacia hidrográfica em elementos de escoamento interligados de acordo com a hierarquia da rede hidrográfica que tendem a representar de forma distribuída a geomorfologia da bacia. Nestes elementos são considerados dois sistemas lineares por forma a considerar o escoamento rápido e o escoamento lento.

Em 1996, Silva, na sua tese de doutoramento apresenta um modelo distribuído hidráulico. O modelo assenta sobre um modelo digital do relevo constituído por uma malha de

triângulos irregulares adjacentes não sobrepostos (TIN). Para modelar o movimento do escoamento superficial é utilizada a equação da onda cinemática, nas encostas representadas pelas superfícies dos triângulos e nas linhas de água que se situam nas intersecções côncavas dos triângulos.

II.2 - Modelos deterministicos agregados

II.2.1 - Modelo geral de um sistema hidrológico agregado

Num sistema hidrológico podemos relacionar a água armazenada no sistema com os caudais de entrada e da saída no sistema hidrológico. De acordo com a equação da continuidade, vem:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = I - Q \qquad \text{(II.2.1.1)}$$

em que:

I caudal de entrada no sistema;

Q caudal de saída do sistema.

A água armazenada num sistema hidrológico, como um reservatório em que o nível da água sobe e desce em resposta a I e a Q e as suas variações com o tempo. O volume armazenado pode ser dado por uma função de armazenamento que será:

$$S = f\left(I, \frac{\partial I}{\partial t}, \frac{\partial^2 I}{\partial t^2}, ..., Q, \frac{\partial Q}{\partial t}, \frac{\partial^2 Q}{\partial t^2}, ...\right) \qquad \text{(II.2.1.2)}$$

II.2.2 - Modelo de um sistema hidrológico linear

A equação S pode ser escrita na seguinte forma:

$$S = a_1 \cdot Q + a_2 \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} + a_3 \cdot \frac{\partial^2 Q}{\partial t^2} + ... + a_n \cdot \frac{\partial^{n-1} Q}{\partial t^{n-1}}$$

$$+ b_1 \cdot I + b_2 \cdot \frac{\partial I}{\partial t} + b_3 \cdot \frac{\partial^2 I}{\partial t^2} + ... + b_m \cdot \frac{\partial^{m-1} I}{\partial t^{m-1}} \qquad \text{(II.2.2.1)}$$

Para que a função S descreva um sistema linear $a_1 = k$, em que k é uma constante do sistema, e os restantes coeficientes são nulos:

$$S = k \cdot Q \qquad \text{(II.2.2.2)}$$

substituindo na equação da continuidade, vem:

$$\frac{\partial(k \cdot Q)}{\partial t} = I - Q \qquad \text{(II.2.2.3)}$$

o que é equivalente a:

$$k \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} + Q(t) = I(t) \qquad \text{(II.2.2.4)}$$

dividindo por k:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{k} \cdot Q(t) = \frac{1}{k} \cdot I(t) \qquad \text{(II.2.2.5)}$$

resolvendo a equação diferencial:

$$e^{\frac{t}{k}} \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{k} \cdot e^{\frac{t}{k}} \cdot Q(t) = \frac{1}{k} \cdot e^{\frac{t}{k}} \cdot I(t) \qquad \text{(II.2.2.6)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(Q \cdot e^{\frac{t}{k}} \right) = \frac{1}{k} \cdot e^{\frac{t}{k}} \cdot I(t) \qquad \text{(II.2.2.7)}$$

integrando, com a condição de $Q = Q_0$ para $t = 0$, vem:

$$\int_{Q_0,0}^{Q(t),t} \partial\left(Q \cdot e^{\frac{t}{k}} \right) = \int_0^t \left(\frac{1}{k} \cdot e^{\frac{t}{k}} \cdot I(\boldsymbol{t}) \right) \partial \boldsymbol{t} \qquad \text{(II.2.2.8)}$$

em que $\boldsymbol{t}$ é uma variável de integração. Resolvendo, vem:

$$Q(t) = Q_0 \cdot e^{-\frac{t}{k}} + \int_0^t \left(\frac{1}{k} \cdot e^{-\frac{(t-t)}{k}} \cdot I(\boldsymbol{t}) \right) \cdot \partial \boldsymbol{t} \qquad \text{(II.2.2.9)}$$

como:

$$Q(t) = \int_0^t [I(\boldsymbol{t}) \cdot u(t - \boldsymbol{t})] \cdot \partial \boldsymbol{t} \qquad \text{(II.2.2.10)}$$

em que as variáveis envolvidas na dedução anterior assumem o seguinte significado:

- t tempo;
- $\boldsymbol{t}$ constante de integração que representa o instante em que ocorre a entrada do volume unitário no sistema linear;
- k constante do sistema.

temos que a resposta de um sistema linear à entrada de um volume unitário instantaneamente no sistema, o que designamos por impulso unitário é dada por:

$$u(t-\tau)=\frac{1}{k}\cdot e^{-\frac{t-\tau}{k}} \qquad \text{(II.2.2.11)}$$

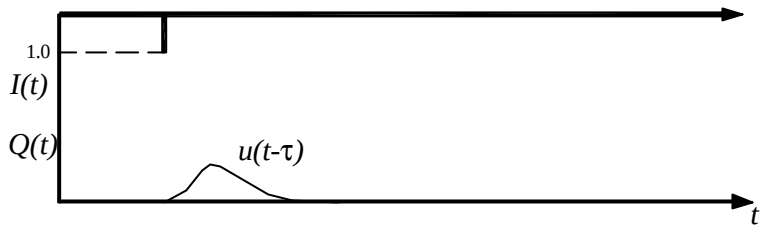


Figura II.2.2.1 - Resposta de um reservatório linear a um impulso unitário

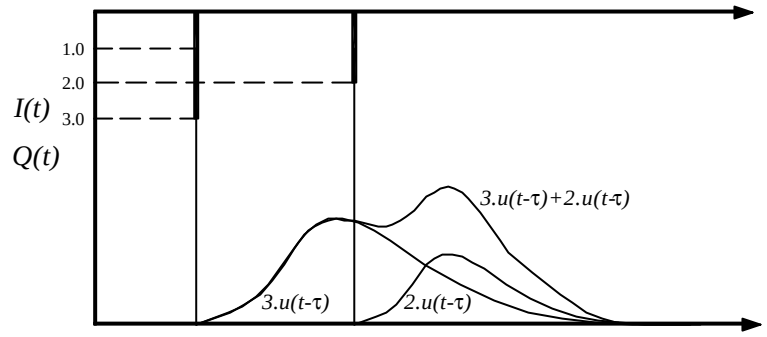


Figura II.2.2.2 - Resposta de um reservatório linear a dois impulsos

Para a entrada de um caudal unitário constante e com duração infinita, a resposta do sistema linear é dada por:

$$g(t)=\int_0^t [u(t-\tau)]\partial(t-\tau) \qquad \text{(II.2.2.12)}$$

$$g(t)=\int_0^t \left[\frac{1}{k}\cdot e^{-\frac{t-\tau}{k}}\right]\partial(t-\tau) \qquad \text{(II.2.2.13)}$$

$$g(t)=1-e^{-\frac{t}{k}} \qquad \text{(II.2.2.14)}$$

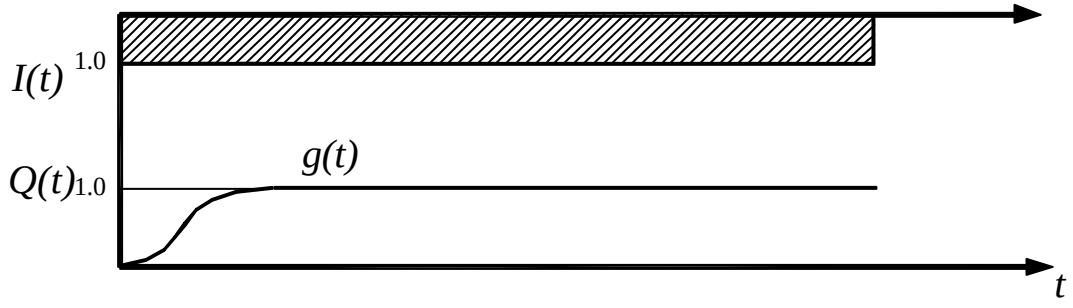


Figura II.2.2.3 - Resposta de um reservatório linear à entrada de um caudal unitário

Para a entrada de um volume unitário no sistema num intervalo de tempo Δt e com caudal $\frac{1}{\Delta t}$, a resposta do sistema é dada por:

$$h(t) = \frac{1}{\Delta t} \cdot [g(t) - g(t - \Delta t)] \qquad \text{(II.2.2.15)}$$

para $0 \le t \le \Delta t$

$$g(t - \Delta t) = 0 \qquad \text{(II.2.2.16)}$$

$$h(t) = \frac{1}{\Delta t} \cdot g(t) = \frac{1}{\Delta t} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{k}}\right) \qquad \text{(II.2.2.17)}$$

para $t > \Delta t$

$$h(t) = \frac{1}{\Delta t} \cdot g(t - \Delta t) = \frac{1}{\Delta t} \cdot \left[1 - e^{-\frac{t}{k}} - \left(1 - e^{-\frac{t-\Delta t}{k}}\right)\right] \qquad \text{(II.2.2.18)}$$

$$h(t) = \frac{1}{\Delta t} \cdot e^{-\frac{t}{k}} \cdot \left(e^{\frac{t}{k}} - 1\right) \qquad \text{(II.2.2.19)}$$

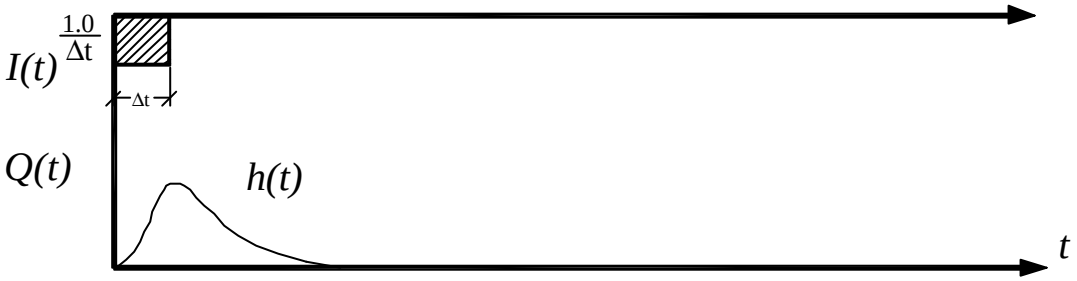


Figura II.2.2.4 - Resposta de um reservatório linear à entrada de um volume unitário num intervalo Dt

II.2.3 - Método de Muskingum

O método de Muskingum é utilizado para modelar o volume armazenado do leito de um rio e o avanço de uma onda de cheia. O método considera o volume de água contido num troço de um rio dividido em duas parcelas, as quais são designadas de acordo com a sua forma geométrica por prisma e cunha, ver figura II.2.3.1.

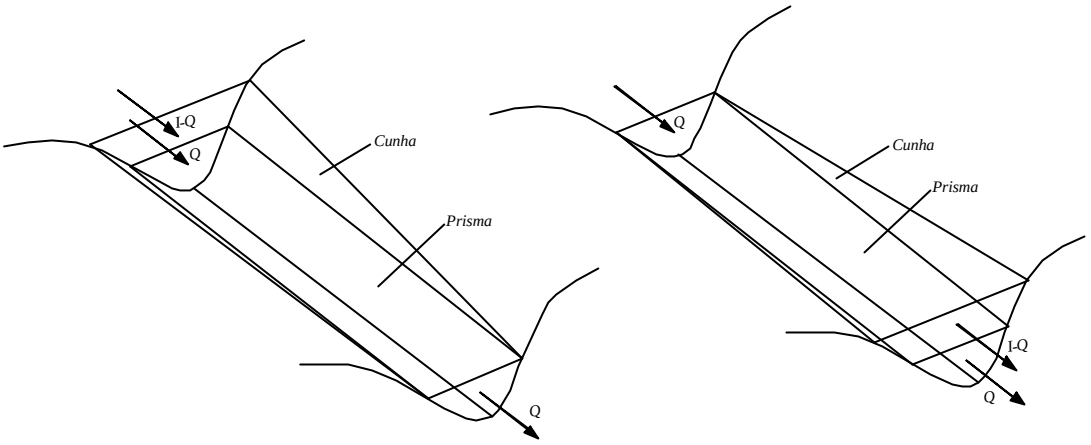


Figura II.2.3.1 - Progressão e recessão de uma onda de cheia

Assumindo que área da secção transversal do escoamento é directamente proporcional ao caudal nessa secção, o volume do prisma é dado por:

$$V_{Prisma} = K \cdot Q \qquad \text{(II.2.3.1)}$$

e o volume da cunha é calculado por:

$$V_{Cunha} = K \cdot X \cdot (I - Q) \qquad \text{(II.2.3.2)}$$

sendo:

Q caudal a sair do troço de leito;

I caudal a entrar no troço de leito;

K constante de proporcionalidade;

X factor de ponderação, em que: $0 \leq X \leq 0.5$

Assim a função de armazenamento é dada por:

$$S = K \cdot Q + K \cdot X \cdot (I - Q) \qquad \text{(II.2.3.3)}$$

$$S = K \cdot [X \cdot I + (1 - X) \cdot Q] \qquad \text{(II.2.3.4)}$$

A equação II.2.3.4 representa a função de armazenamento de um reservatório linear. Se X = 0, não existe cunha, nesta situação trata-se do modelo de um reservatório suficientemente largo e fundo para que a superfície livre seja sempre horizontal, mesmo quando existe entrada de água numa extremidade e saída na outra. Em leitos naturais o valor de X costuma variar entre 0 e 0.3, sendo normalmente 0.2, de acordo com (Chow, 1988). O parâmetro K representa o tempo que a onda leva a percorrer o troço de canal.

A função de armazenamento pode ser escrita para o instante $j \cdot \Delta t$, resultando:

$$S_j = K \cdot \left[X \cdot I_j + (1 - X) \cdot Q_j \right] \quad \text{(II.2.3.5)}$$

e para o instante $(j+1)\cdot\Delta t$ como:

$$S_{j+1} = K \cdot \left[X \cdot I_{j+1} + (1 - X) \cdot Q_{j+1} \right] \quad \text{(II.2.3.6)}$$

a variação de armazenamento no intervalo Δt, é:

$$S_{j+1} - S_j = K \cdot \left\{ \left[X \cdot I_{j+1} + (1 - X) \cdot Q_{j+1} \right] - \left[X \cdot I_j + (1 - X) \cdot Q_j \right] \right\} \quad \text{(II.2.3.7)}$$

esta mesma variação também pode ser escrita na seguinte forma:

$$S_{j+1} - S_j = \frac{I_j + I_{j+1}}{2} \cdot \Delta t - \frac{Q_j + Q_{j+1}}{2} \cdot \Delta t \quad \text{(II.2.3.8)}$$

combinando as equações II.2.3.7 e II.2.3.8, obtém-se:

$$Q_{j+1} = C_1 \cdot I_{j+1} + C_2 \cdot I_j + C_3 \cdot Q_j$$

sendo:

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2 \cdot K \cdot X}{2 \cdot K \cdot (1 - X) + \Delta t} \quad \text{(II.2.3.9)}$$

$$C_2 = \frac{\Delta t + 2 \cdot K \cdot X}{2 \cdot K \cdot (1 - X) + \Delta t} \quad \text{(II.2.3.10)}$$

$$C_3 = \frac{2 \cdot K \cdot (1 - X) - \Delta t}{2 \cdot K \cdot (1 - X) + \Delta t} \quad \text{(II.2.3.11)}$$

convém verificar que:

$$C_1 + C_2 + C_3 = 1 \quad \text{(II.2.3.12)}$$

se os hidrogramas de saída e de entrada forem conhecidos, o valor de K pode ser determinado por:

$$K = \frac{0.5 \cdot \Delta t \cdot \left[(I_{j+1} + I_j) - (Q_{j+1} + Q_j) \right]}{X \cdot (I_{j+1} - I_j) + (1 - X) \cdot (Q_{j+1} - Q_j)} \quad \text{(II.2.3.13)}$$

II.2.4 - Reservatórios lineares em série

O cálculo de um reservatório linear pode ser efectuado pelo método de Muskingum com a variável X nula. De acordo com (Nash, 1957 em Chow, 1988), o modelo hidrológico de uma bacia hidrográfica pode ser descrito por *n* reservatórios lineares em série.

A resposta de *n* reservatórios lineares à entrada de um volume unitário instantaneamente em cada um deles representa o hidrograma unitário instantâneo da bacia.

A resposta de um reservatório linear à entrada de um volume unitário instantaneamente, já foi deduzida no tópico "Modelo de um reservatório linear":

$$u(t-\tau)=\frac{1}{k}\cdot e^{-\frac{t-\tau}{k}} \qquad \text{(II.2.4.1)}$$

esta função descreve a saída do primeiro reservatório, que entra no segundo. O caudal de saída do segundo reservatório será:

$$q_2=\int_0^t\left[I(\tau)\cdot u(t-\tau)\right]\partial\tau \qquad \text{(II.2.4.2)}$$

$$q_2=\int_0^t\left[\frac{1}{k}\cdot e^{-\frac{\tau}{k}}\cdot\frac{1}{k}\cdot e^{-\frac{t-\tau}{k}}\right]\partial\tau \qquad \text{(II.2.4.3)}$$

$$q_2=\frac{t}{k^2}\cdot e^{-\frac{t}{k}} \qquad \text{(II.2.4.4)}$$

o caudal de saída do segundo reservatório entra no terceiro e assim sucessivamente. O caudal de saída do reservatório *n* será dado por:

$$q_n(t)=u(t)=\frac{1}{\Gamma(n)}\cdot\left(\frac{t}{k}\right)^{n-1}\cdot e^{-\frac{t}{k}} \qquad \text{(II.2.4.5)}$$

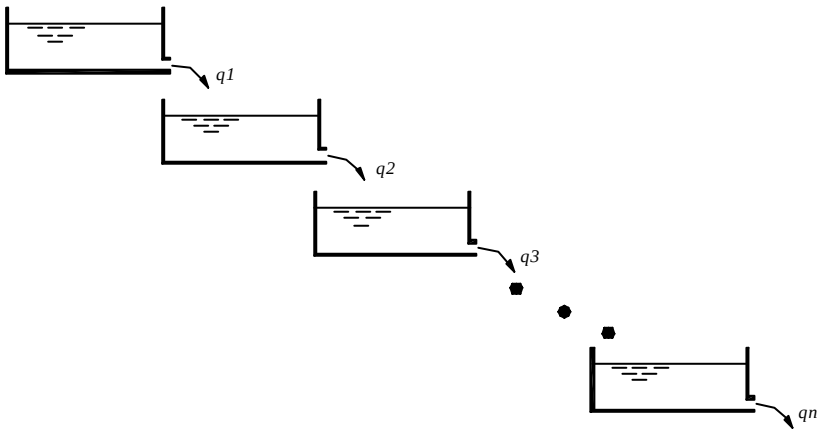


Figura II.2.4.1 - Reservatórios lineares em série

Modelos de bacias hidrográficas podem ser constituídos por uma rede de reservatórios lineares, cuja constante *k* é função do número de ordem do troço que este reservatório representa e a hierarquia destes reservatórios representa a rede hidrográfica da bacia a modelar. Desta forma pode-se elaborar um hidrograma instantâneo geomorfológico. (Boyd, et

al., 1979; Rodriguez-Iturbe, e Valdes, 1979; Gupta, et al., 1980, Gupta, Rodriguez-Iturbe, e Wood, 1986, em Chow, 1980).

II.2.5 - Hidrograma unitário

O hidrograma unitário é a função de resposta de um sistema hidrológico linear à entrada de um volume unitário no sistema num intervalo de tempo Δt , (Sherman, 1932 em Chow, 1988).

O hidrograma unitário de uma bacia hidrográfica é definido como o hidrograma de escoamento superficial directo resultante de 1 cm de precipitação efectiva uniformemente distribuída sobre a bacia hidrográfica com intensidade constante e duração unitária.

O hidrograma unitário é um modelo de um reservatório linear e é utilizado para determinar o hidrograma resultante de uma precipitação efectiva qualquer.

O modelo considera as seguintes simplificações:

- a precipitação efectiva tem intensidade constante durante a duração unitária;

- o excesso de precipitação é uniformemente distribuído por toda a área da bacia hidrográfica;

- o tempo base do hidrograma resultante de uma precipitação efectiva qualquer de duração unitária é constante;

- as ordenadas de um hidrograma unitário são directamente proporcionais à precipitação efectiva com duração unitária que o gerou;

- numa bacia hidrográfica a forma do hidrograma unitário reflecte as suas características.

A utilização deste modelo é indicada para pequenas bacias hidrográficas e dá melhores resultados nas seguintes situações:

- chuvas de curta duração que originam um hidrograma com um único pico bem definido;

- o hidrograma unitário não se aplica quando a área da bacia é demasiado grande para que nela ocorra uma chuvada espacialmente uniformemente distribuída;

- empregam-se os princípios da proporcionalidade e interdependência entre caudais simultâneos;

- o hidrograma unitário é único para uma determinada secção de uma bacia hidrográfica e invariável com o tempo, isto representa o principio da invariância.

II.2.6 - Hidrograma unitário sintético

O hidrograma unitário determinado para uma secção de uma linha de água de uma bacia hidrográfica é válido sómente nessa secção. Os hidrogramas unitários sintéticos servem para determinar hidrogramas unitários para outras secções da mesma bacia hidrográfica ou mesmo para outras bacias hidrográficas com características semelhantes.

II.2.7 - Hidrograma unitário sintético de Snyder's

Ente hidrograma desenvolvido por (Snyder, 1938 e U.S. Army Corps of Engineers, 1959) resultou do estudo de inúmeras bacias hidrográficas com áreas compreendidas entre 30 e 30 000 km^2 localizadas nas montanhas dos Apalaches.

O hidrograma unitário standard de Snyder é aquele em que a relação entre a duração da chuva e o tempo de retardamento é:

$$t_p = 5.5 \cdot t_r \qquad \text{(II.2.7.1)}$$

em que:

t_r tempo de duração da chuva.

Neste hidrograma unitário sintético, o tempo de retardamento ou "*basin lag*" é dado por:

$$t_p = C_1 \cdot C_t \cdot \left(L \cdot L_c\right)^{0.3} \qquad \text{(II.2.7.2)}$$

sendo:

t_p tempo de retardamento em horas;

L comprimento do canal principal (estirão) em km;

L_c distância em km desde a secção de controlo até ao ponto localizado na linha de água principal mais próximo do centro de gravidade da bacia;

C_1 constante igual a 0.75.

C_t coeficiente determinado por comparação com os hidrogramas de estações instrumentadas com as mesmas características.

O caudal de pico é:

$$q_p = \frac{C_2 \cdot C_p}{t_p} \qquad \text{(II.2.7.3)}$$

em que:

q_p caudal de pico por unidade de área da bacia hidrográfica e por centímetro de precipitação efectiva;

C_2 constante igual a 2.75;

C_p coeficiente determinado por comparação com bacias instrumentadas com as mesmas características.

O cálculo de C_t e C_p para uma bacia instrumentada é efectuado do seguinte modo:

- os valores de L e L_c são medidos sobre a carta da bacia;
- com base num hidrograma unitário da bacia, determina-se duração efectiva t_R em horas e o tempo de retardamento t_{pR} em horas e o caudal de pico por unidade de área em $m^3/s \cdot km^2 \cdot cm$;
- se $t_{pR} = 5.5 \cdot t_R$, então $t_R = t_r = t_{pR} = t_p$, e $q_{pR} = q_p$. Nesta situação C_t e C_p são calculados pela equação II.2.7.2 e II.2.7.3;
- se $t_{pR} \neq 5.5 \cdot t_R$, o tempo de retardamento é:

$$t_p = t_{pR} + \frac{t_r - t_R}{4} \qquad \text{(II.2.7.4)}$$

as equações II.2.7.1 e II.2.7.4 são resolvidas para t_r e t_p. Os valores de C_t e C_p são calculados pelas equações II.2.7.2.

quando uma bacia não instrumentada tem as mesmas características de uma bacia instrumentada, na qual os parâmetros C_t e C_p foram determinados, estes parâmetros são utilizados no hidrograma da estação não instrumentada.

- a relação entra q_p e q_{pR} é dada por:

$$q_{pR} = \frac{q_p \cdot t_p}{t_{pR}} \qquad \text{(II.2.7.5)}$$

- o tempo base do hidrograma é determinado por forma a que a área do hidrograma seja igual ao volume de uma lamina de água com um centímetro distribuída uniformemente por toda a área da bacia. Assumindo uma forma triangular do hidrograma unitário, o tempo base é calculado por:

$$t_b = \frac{C_3}{q_{pR}} \qquad \text{(II.2.7.6)}$$

em que:

C_3 constante igual a 5.56.

A largura em horas do hidrograma unitário para 75% e 50% do caudal de ponta é dada por:

$$W = C_w \cdot q_{pR}^{-1.08} \qquad \text{(II.2.7.7)}$$

sendo:

C_w constante igual 1.22 para 75% e 2.44 para 50%.

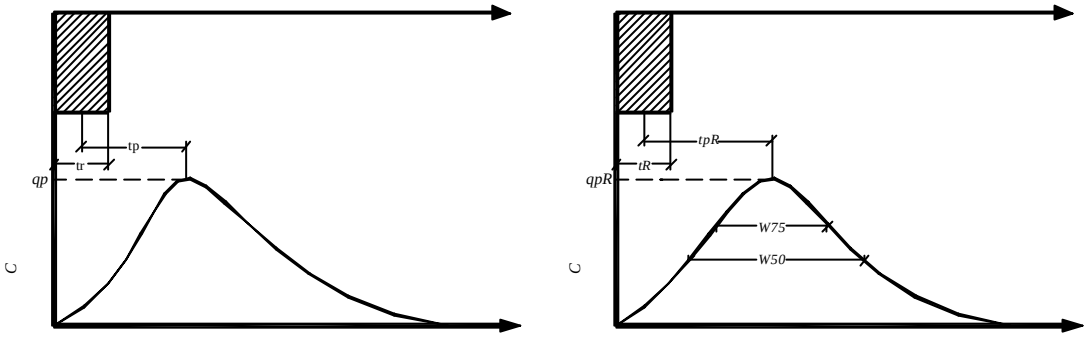


Figura II.2.7.1 - Hidrograma unitário sintético de Snyder's

II.2.8 - Hidrograma adimensional do Soil Conservation Service

O hidrograma adimensional do Soil Conservation Service é um hidrograma unitário sintético no qual a curva do hidrograma é dada de forma adimensional por:

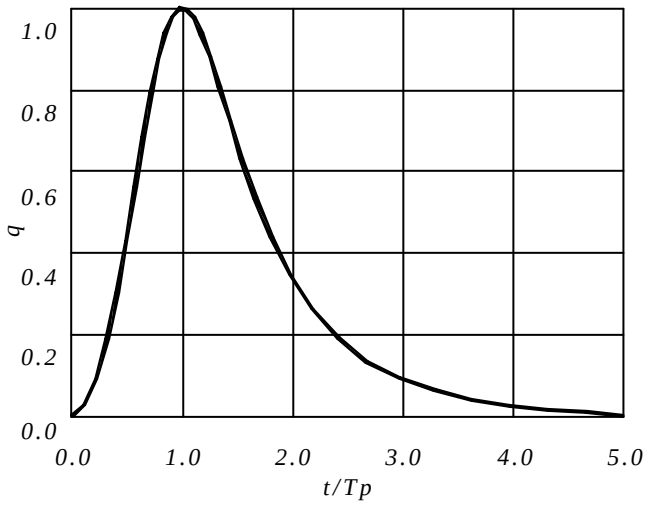


Figura II.2.8.1 - Hidrograma unitário sintético adimensional do SCS

O caudal de pico pode ser determinado por:

$$q_p = \frac{2.08 \cdot A}{T_p} \qquad \text{(II.2.8.1)}$$

em que:

A área da bacia em km;

T_p tempo de ascensão.

O tempo de ascensão é calculado de acordo com a seguinte fórmula:

$$T_p = \frac{t_r}{2} + 0.6 \cdot T_c \qquad \text{(II.2.8.4)}$$

sendo:

T_c tempo de concentração da bacia;

t_r duração da chuva unitária, $t_r = T_c/5$.

O tempo de recessão é dado por:

$$T_r = 1.67 \cdot T_p \qquad \text{(II.2.8.5)}$$

II.2.9 - Hidrograma unitário triangular do Soil Conservation Service

O hidrograma unitário triangular é uma versão simplificado do hidrograma adimensional em que se assume por simplificação que a forma do hidrograma unitário é triangular.

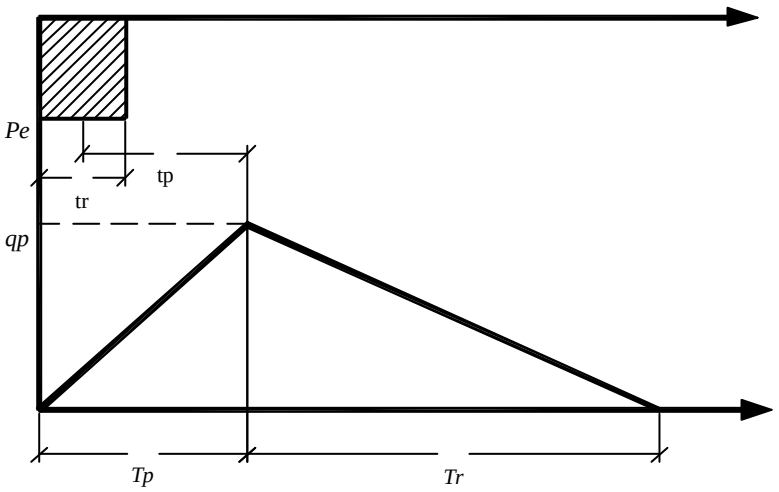


Figura II.2.9.1 - Hidrograma unitário sintético triangular do SCS

Para o cálculo de q_p, T_p e T_r utilizam-se as expressões apresentadas para o hidrograma unitário sintético adimensional do SCS.

II.3 - Modelos deterministicos distribuídos

O movimento da água sobre o solo e nas linhas de água é um processo distribuído no tempo e no espaço. A modelação deste processo baseia-se na resolução das equações de Saint-Venant, cuja dedução é apresentada no capítulo IV.

As equações de Saint-Venant são a equação de conservação da massa:

$$\frac{\partial Q}{\partial x}+\frac{\partial A}{\partial t}=q \qquad \text{(II.3.1)}$$

e a equação de conservação da quantidade de movimento:

$$\frac{1}{A}\cdot\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{1}{A}\cdot\frac{\partial}{\partial x}\cdot\left(\frac{Q^2}{A}\right)+g\cdot\frac{\partial y}{\partial x}-g\cdot\left(S_0-S_f\right)=0 \qquad \text{(II.3.2)}$$

em que as variáveis assumem o seguinte significado:

A área da secção transversal do escoamento;

q caudal de percurso;

Q caudal;

t tempo;

x distância segundo a direcção do escoamento;

y altura da lâmina de água;

g aceleração da gravidade;

S_0 declive do perfil longitudinal;

S_f declive da linha de energia.

Estas equações não têm resolução analítica e a sua resolução numérica constitui o modelo de onda dinâmica. Desprezando o primeiro termo da equação da conservação da quantidade de movimento, temos o modelo de inércia nula. Desprezando os dois primeiros termos da equação da conservação da quantidade de movimento, temos o modelo de onda cinemática, ao qual é dedicado o capítulo V deste trabalho.

Para a resolução numérica das equações de Saint-Venant existe uma variedade de métodos numéricos a que podemos recorrer. Estes métodos dividem-se em métodos explícitos e métodos implícitos. Nos métodos implícitos escreve-se um sistema de equações algébricas aplicando as equações de Saint-Venant simultaneamente a todas as incógnitas para todos os instantes considerados. Estes métodos apresentam vantagens quando comparados

com os métodos explícitos por se revelarem mais estáveis, necessitando de incrementos de tempo menores.

Os métodos explícitos têm que obedecer à condição de Courant:

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{C_d} \qquad \text{(II.3.3)}$$

sendo:

Δt incremento de tempo;

Δx incremento de posição segundo a direcção do escoamento;

C_d celeridade da onda dinâmica.

A celeridade da onda dinâmica pode ser determinada de forma aproximada por:

$$C_d = \sqrt{g \cdot y} \qquad \text{(II.3.4)}$$

em que:

g aceleração da gravidade;

y altura da lâmina de água.

II.3.1 - Um método explicito para a resolução numérica das equações de Saint-Venant

Pela sua simplicidade apresenta-se nesta síntese de conhecimentos um método explicito para a resolução numérica das equação de Saint-Venant.

Para a resolução numérica das equações de Saint-Venant por diferenças finitas e implementar o modelo de onda dinâmica, recorrendo a um método explicito, considera-se o continuo espaço tempo discretizado de acordo com as seguinte figura:

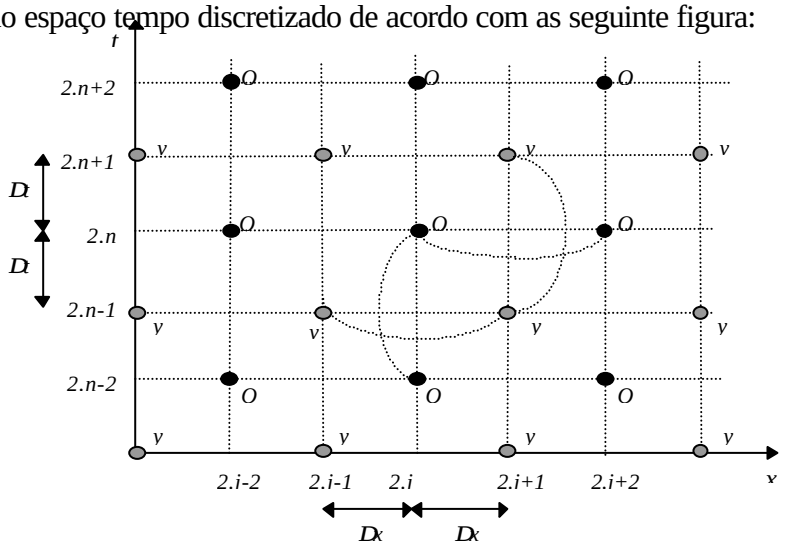


Figura II.3.1.1 - Discretização do continuo espaço tempo

Escrevendo a equação da conservação da massa sob a forma de diferenças finitas, obtemos:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta x} + b(h) \cdot \frac{\Delta y}{\Delta t} = q \qquad \text{(II.3.1.1)}$$

$$\frac{Q_{2\cdot j+2}^{2\cdot n+1} - Q_{2\cdot j}^{2\cdot n+1}}{2 \cdot \Delta x} + b\left(y_{2\cdot j+1}^{2\cdot n}\right) \cdot \frac{y_{2\cdot j+1}^{2\cdot n+2} - y_{2\cdot j+1}^{2\cdot n}}{2 \cdot \Delta t} = q_{2\cdot j} \qquad \text{(II.3.1.2)}$$

explicitando o termo $y_{2\cdot j+1}^{2\cdot n+2}$, obtém-se:

$$y_{2\cdot j+1}^{2\cdot n+2} = y_{2\cdot j+1}^{2\cdot n} + q_{2\cdot j} \cdot \frac{2 \cdot \Delta t}{b\left(y_{2\cdot j+1}^{2\cdot n}\right)} - \frac{\Delta t}{b\left(y_{2\cdot j+1}^{2\cdot n}\right)} \cdot \frac{Q_{2\cdot j+2}^{2\cdot n+1} - Q_{2\cdot j}^{2\cdot n+1}}{\Delta x} \qquad \text{(II.3.1.3)}$$

Substituindo o termo da perda de carga S_f pela lei de resistência do escoamento de Chezy na equação de conservação da quantidade de movimento e escrevendo-a sob a forma de diferenças finitas, vem:

$$\frac{Q_{2\cdot j}^{2\cdot n+1} - Q_{2\cdot j}^{2\cdot n+1}}{2 \cdot \Delta t} + \frac{\left(\frac{Q^2}{A\left(y_{2\cdot j+1}^{2\cdot n}\right)}\right)_{2\cdot j+2}^{2\cdot n-1} - \left(\frac{Q^2}{A\left(y_{2\cdot j+1}^{2\cdot n}\right)}\right)_{2\cdot j-2}^{2\cdot n-1}}{4 \cdot \Delta x}$$

$$+ g \cdot A\left(y_{2\cdot j+1}^{2\cdot n}\right) \cdot \left(\frac{y_{2\cdot j+1}^{2\cdot n} - y_{2\cdot j-1}^{2\cdot n}}{2 \cdot \Delta x} + \frac{z_{2\cdot j+1} - z_{2\cdot j-1}}{2 \cdot \Delta x} \right)$$

$$+ \frac{g \cdot Q_{2\cdot j}^{2\cdot n-1} \cdot \left|Q_{2\cdot j}^{2\cdot n+1}\right|}{C\left(R\left(y_{2\cdot j+1}^{2\cdot n}\right)\right) \cdot A\left(y_{2\cdot j+1}^{2\cdot n}\right) \cdot R\left(y_{2\cdot j+1}^{2\cdot n}\right)}$$

(II.3.1.4)

explicitando o termo $Q_{2\cdot j}^{2\cdot n+1}$, obtém-se:

$$Q_{2\cdot j}^{2\cdot n+1} = Q_{2\cdot j}^{2\cdot n+1} - \frac{\Delta t}{2 \cdot \Delta x} \cdot \left[\left(\frac{Q^2}{A\left(y_{2\cdot j+1}^{2\cdot n}\right)} \right)_{2\cdot j+2}^{2\cdot n-1} - \left(\frac{Q^2}{A\left(y_{2\cdot j+1}^{2\cdot n}\right)} \right)_{2\cdot j-2}^{2\cdot n-1} \right]$$

$$- \frac{g \cdot A\left(y_{2\cdot j+1}^{2\cdot n}\right) \cdot \Delta t}{\Delta x} \cdot \left(y_{2\cdot j+1}^{2\cdot n} - y_{2\cdot j-1}^{2\cdot n} + z_{2\cdot j+1} - z_{2\cdot j-1} \right)$$

$$- \frac{2 \cdot \Delta t \cdot g \cdot Q_{2\cdot j}^{2\cdot n-1} \cdot \left|Q_{2\cdot j}^{2\cdot n-1}\right|}{C\left(R\left(y_{2\cdot j+1}^{2\cdot n}\right)\right) \cdot A\left(y_{2\cdot j+1}^{2\cdot n}\right) \cdot R\left(y_{2\cdot j+1}^{2\cdot n}\right)}$$

(II.3.1.5)

Discretizando o contínuo espaço tempo e representando-o como na figura II.3.1.1, obtem-se uma grelha, cujos nós representam os pontos onde serão calculados os valores de *y* e de *Q* , para aplicar o método numérico de resolução das equações diferenciais de Saint-Venant é necessário conhecer as equações de fronteira, ou sejam os valores de *h* em todas as secções para $t = 0$, o qual se obtém por processos que assumem o regime permanente, ou seja o caudal constante em ordem ao tempo e os valores de *Q* para todos os instantes na primeira e na última secção que dependem dos cenários considerados.

II.3.2 - Método de Muskingum-Cunge

Este método proposto por (Cunge, 1969 em Chow, 1988) baseia-se no método de Muskingum e no modelo de onda cinemática.

Se o contínuo espaço tempo for discretizado e representado numa grelha numérica, como apresentado no capitulo V para a resolução numérica da onda cinemática, a equação de Muskingum pode ser escrita na seguinte forma:

$$Q_{i+1}^{j+1} = C_1 \cdot Q_i^{j+1} + C_2 \cdot Q_i^j + C_3 \cdot Q_{i+1}^j \qquad \text{(II.3.2.1)}$$

As variáveis C_1, C_2 e C_3 têm o mesmo significado do que no método de Muskingum já apresentado.

Com base na teoria da onda cinemática, as variáveis *X* e *K* do método de Muskingum podem ser calculadas por:

$$K = \frac{\Delta x}{c_k} \qquad \text{(II.3.2.2)}$$

e:

$$X = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{Q}{B \cdot c_k \cdot S_0 \cdot \Delta x} \right) \qquad \text{(II.3.2.3)}$$

sendo:

- c_k celeridade da onda cinemática (ver capítulo V);
- Q caudal na secção considerada;
- B largura superficial do escoamento na secção considerada.

II.4 - Modelos estocásticos

Processos hidrológicos como a precipitação por exemplo em parte deterministicos e em parte aleatórios ou estocásticos, mas em que a componente aleatória assume papel preponderante no processo, este considera-se um processo puramente aleatório.

Com base em série de dados é possível determinar a relação entre a intensidade, duração e frequência da precipitação. A metodologia para o estabelecimento destas equações sai fora do âmbito deste trabalho. Estas equações estão estabelecidas para a região e são referidas no capítulo III.

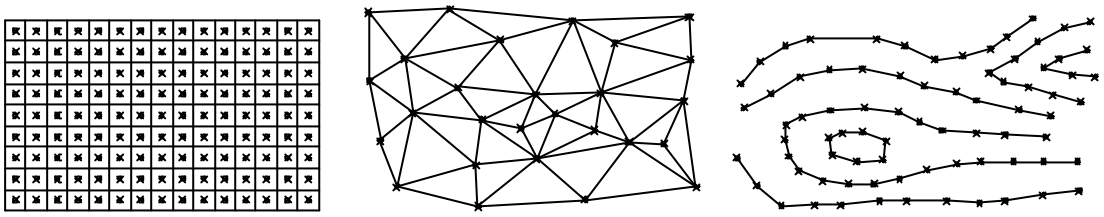
II.5 - Definição das propriedades do terreno

Um dos factores mais importantes para o correcto desempenho de um modelo hidráulico distribuído de escoamento superficial é a adequada definição da geomorfologia do domínio espacial no qual ele é empregue. Isto conduz-nos a que os dados espacialmente distribuídos, portanto geo-referênciados sejam organizados num modelo digital do terreno MDT.

Quando se considera só a topografia e se abstrai toda a restante informação geo-referênciada, tem-se um modelo digital do relevo, MDR, mais conhecido por DEM, do Inglês "*Digital Elevation Model*".

Os dados numéricos que integram um DEM podem ser do tipo vectorial ou do tipo *raster*. Nos DEM vectoriais a cada ponto correspondem três valores. Dois são as coordenadas de posição e o terceiro a respectiva cota. Nos DEM *raster* os pontos cotados dispõem-se regularmente formando os centros de gravidade de células quadradas dispostas numa malha regular.

Os DEM vectoriais podem ser constituídos por triângulos irregulares contíguos não sobrepostos com os vértices apoiados nos pontos cotados o que se designa por TIN do inglês "*Triangular Irregular Network*". Também podem ser constituídos por curvas de nível, cada uma caracterizado pela sua cota e pelas coordenadas geográficas de pontos, regular ou irregularmente espaçados, situados ao longo da mesma.



a) b) c)

Figura 2.5.1 - Modelos digitais do relevo: a) Malha regular de células; b) malha triangular irregular; c) isolinhas de altitude.

As malhas de células regulares são especialmente capacitadas para a utilização em sistemas de Informação Geográfica, SIG. Permitem uma grande eficácia na combinação de elementos com caracter espacial. Outra vantagem das malhas de células regulares é a sua adequação à integração pela estrutura de dados do tipo *raster*, mesma estrutura em que é obtida a informação por detecção remota. Isto reforça as vantagens deste tipo de malhas no meio dos SIG. As malhas de células regulares são fáceis de implementar em termos de cálculo computacional e conduzem a uma boa eficiência de cálculo.

A utilização deste tipo de malhas tem como desvantagens a dependência entre os resultados do modelo e a dimensão da quadrícula e o traçado em zigue zague que pode surgir no traçado da rede hidrográfica, o que pode ser evitado se forem tomadas as devidas precauções.

A possibilidade de posicionamento arbitrário dos pontos nos modelos TIN, levam a que estes modelos tenham uma representação mais precisa de certos acidentes topográficos porém gerar a malha a partir dos pontos cotados e adequa-la ao modelo do escoamento superficial revela-se um processo mais complexo do que em malhas de células regulares. Um modelo distribuído de simulação do escoamento superficial sobre um modelo digital do relevo TIN é desenvolvido e apresentado por Silva, 1996.

A estruturação dos dados em isolinhas de altitude ou curvas de nível é a forma mais corrente em mapas e cartas topográficas. No entanto para o processamento automático da informação esta forma não é adequada.

Os modelos distribuídos não têm obrigatoriamente que assentar sobre um modelo digital do terreno. Uma outra abordagem será dividir a bacia hidrográfica em sub-bacias,

poços, ou fontes que genéricamente se designam elementos hidrologicos. Estes elementos são ligados por uma rede hidrológica dentritica e os cálculos são efectuados na sequência de montante para jusante. Cada elemento hidrológico tem as suas propriedades e os cálculos até podem ser efectuados em cada elemento por modelos diferentes, conforme o que for mais adequado ao respectivo elemento hidrológico. Cada elemento provoca uma descarga na rede. Esta é definida pelo seu perfil longitudinal e respectivas secções transversais criteriosamente escolhidas. Neste canal ou rede de canais é aplicado um modelo que permite calcular o caudal na secção pretendida. Este é o funcionamento do HEC-1 ou na sua versão mais recente HEC-HMS, com certeza o modelo de precipitação/escoamento superficial mais divulgado no mundo.

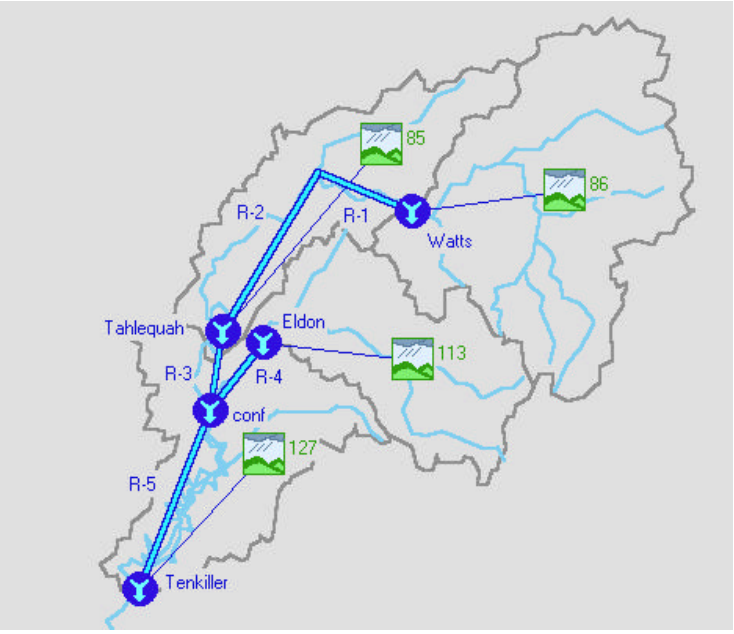


Figura II.5.2 - Estruturação funcional do programa HEC-HMS[1]

[1] Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System, Army Corps of Engineers, USA

III - Caudais de percurso

O cálculo dos caudais de percurso é determinado com base no excesso de precipitação, numa visão do escoamento superficial, como a descrita por Horton, 1933. Assim para cada célula e para cada instante é determinada a precipitação total e a parcela desta que contribui para o escoamento superficial, denominada precipitação efectiva. Para o cálculo desta parcela foram empregues dois métodos: a equação de Green-Ampt e o método da Curva Número do Soil Conservation Service.

III.1 Precipitação

As simulações efectuadas referem-se a um determinado período de tempo, do qual se dispõe da precipitação horária medida em udógrafos colocados na vizinhança da bacia hidrográfica, bem como do limnigrama e respectiva curva de vazão de uma secção de controlo.

A precipitação em cada célula é calculada a partir dos udogramas obtidos nas estações meteorológicas. O valor da precipitação numa célula é dado pela média ponderada pelo inverso das distâncias às respectivas estações meteorológicas. Este método foi proposto por Wei e McGuiness, 1973 e vem referido em Chow, 1988.

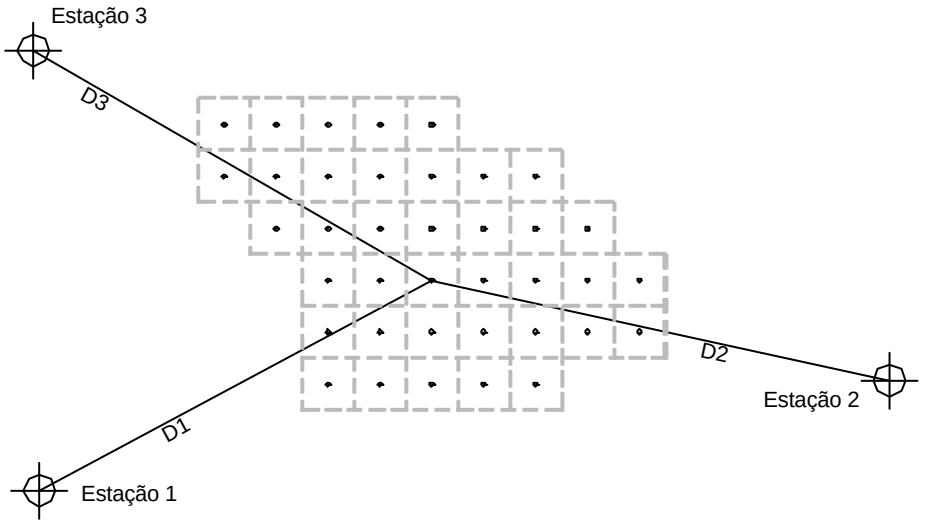


Figura III.1.1 - Distâncias às estações meteorológicas

A distância entre as estações meteorológicas e qualquer um dos centros de gravidade das células é conhecida, sendo a distância entre a estação meteorológica *e* e a célula *i* dada pela seguinte expressão:

$$d_{e,i} = \sqrt{\left(x_i - x_e\right)^2 + \left(y_i - y_e\right)^2} \qquad \text{(III.1.1)}$$

em que:

x_i, y_i coordenadas de posição da célula *i*;

x_e, y_e coordenadas de posição da estação *e*.

O valor da precipitação numa determinada célula correspondente a um determinado instante será dado pela média ponderada pelo inverso das distâncias à estações udográficas consideradas.

$$p_i^j = \frac{\sum_{k=1}^{ne}\left(p_k^j \cdot \frac{1}{d_{k,i}}\right)}{\sum_{k=1}^{ne}\left(\frac{1}{d_{k,i}}\right)} \qquad \text{(III.1.2)}$$

sendo:

p_i^j precipitação na célula *i*, no tempo *j*;

$d_{k,i}$ distância entre a célula i e a estação *k*;

p_k^j precipitação na estação *k*, no tempo *j*;

i número da célula;

j intervalo de tempo;

ne número de estações udográficas consideradas.

Desta forma determina-se a precipitação distribuída no tempo e no espaço. Este método um outros para o mesmo fim, com os polígonos de Thiessen dão valores aproximados quando se consideram valores de precipitação médios. Quando são aplicados a um evento meteorológico, a distribuição espacial da precipitação pode não corresponder aos pressupostos destes métodos, principalmente quando se trata de chuvas intensas.

III.2 - Equações de infiltração

A infiltração é o processo pelo qual a água passa da superfície do solo para o interior deste. A velocidade de infiltração é influenciada por muitos factores, a vegetação a porosidade, conductividade hidráulica e teor de humidade do solo.

O solo é um elemento com grande variabilidade espacial. Sendo formado por horizontes que formam camadas horizontais com propriedades diferentes. De um local para outro também se podem verificar alterações das propriedades do solo, mesmo para sítios muito próximos. Isto faz com que a infiltração seja um processo complexo que só pode ser traduzido por equações de uma forma aproximada.

O avanço de uma frente de humedecimento pode ser esquematizado num gráfico em que se representa o teor de humidade volumétrico em função da profundidade, como mostrado na figura III.2.1.

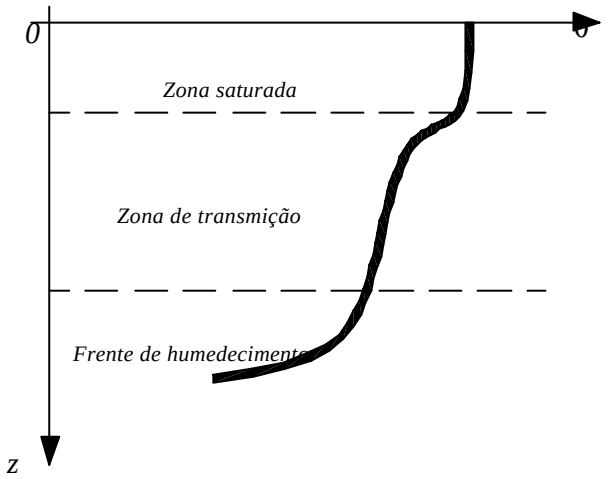


Figura III.2.1 - Avanço de uma frente de humedecimento

III.2.1 - Equação de Green-Ampt

Para lidar com este problema Green-Ampt, 1911 propôs um esquema simplificado do avanço de uma frente de humedecimento, com base no qual o tratamento matemático do problema se torna mais fácil.

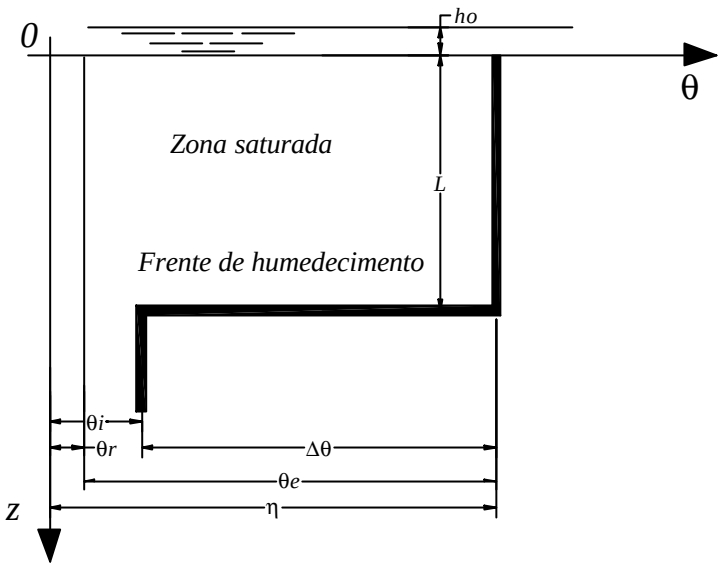


Figura III.2.1.1 - Avanço de uma frente de humedecimento no modelo de Green-Ampt

Na figura III.2.1.1 as variáveis assumem o seguinte significado:

θ_i teor de humidade volumétrico inicial;

θ_r teor de humidade volumétrico residual;

θ_e teor de humidade volumétrica efectiva;

$\Delta\theta$ variação do teor de humidade;

η porosidade;

L profundidade da frente de humedecimento para um tempo t;

h_0 altura da lâmina de água acima da superfície do solo.

Para o estudo do processo considera-se uma coluna de solo com secção transversal de área unitária na qual o solo tem teor de humidade θ_i em todo o perfil. Ao passar a frente de humedecimento o teor de humidade volumétrico passa para η.

Num determinado instante, o volume de água infiltrado é dado por:

$$F(t) = L \cdot (\eta - \theta_i) \qquad \text{(III.2.1.1)}$$

ou seja:

$$F(t) = L \cdot \Delta\theta \qquad \text{(III.2.1.2)}$$

Sendo *F(t)* a função da infiltração acumulada.

Por outro lado o movimento da água em meios porosos pode ser traduzido de acordo com a lei de Darcy por:

$$q = -K \cdot \frac{\partial h}{\partial z} \qquad \text{(III.2.1.3)}$$

Como a infiltração é positiva no sentido descendente, tem-se:

$$f = -q \qquad \text{(III.2.1.4)}$$

Considerando dois pontos, um situado na superfície do solo *(A)* e outro na frente de humedecimento *(B)*, a equação 5.1.3 pode ser escrita na seguinte forma:

$$f = K \cdot \left[\frac{h_A - h_B}{z_A - z_B} \right] \qquad \text{(III.2.1.5)}$$

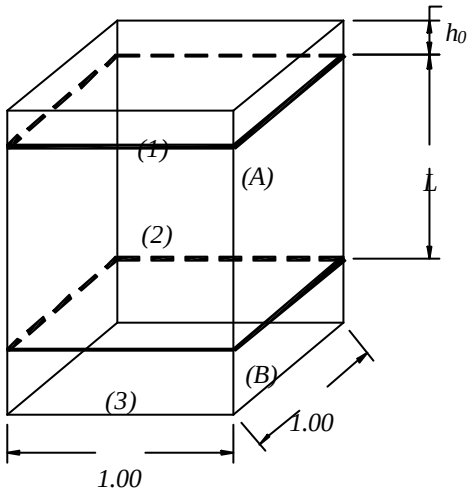


Figura III.2.1.2 - Infiltração numa coluna de solo

A zona *(1)* representa a altura da lâmina de água à superfície devido ao excesso de precipitação (situação em que a intensidade de precipitação é superior à infiltração potencial máxima). A zona *(2)* representa o solo já afectado pela frente de humedecimento com teor de humidade volumétrico igual à porosidade. A zona *(3)* identifica o solo ainda não afectado pela frente de humedecimento e com teor de humidade volumétrico θ_i.

A carga no ponto *A* é igual à altura h_0 e no ponto B é igual a $-L-y$. Substituindo na equação de Darcy, vem:

$$f = K \cdot \frac{h_0 - (-y - L)}{L} \qquad \text{(III.2.1.6)}$$

Como a altura h_0 é pequena quando comparada com ψ e L , pode-se admitir que:

$$f \approx K \cdot \frac{\psi + L}{L} \qquad \text{(III.2.1.7)}$$

Como a profundidade da frente de humedecimento é dada por:

$$L = \frac{F}{\Delta\theta} \qquad \text{(III.2.1.8)}$$

Substituindo na equação III.2.1.7, obtém-se:

$$f = K \cdot \frac{\psi \cdot \Delta\theta + F}{F} \qquad \text{(III.2.1.9)}$$

Como a taxa de infiltração f é a derivada da infiltração acumulada F em ordem ao tempo:

$$f = \frac{\partial F}{\partial t} \qquad \text{(III.2.1.10)}$$

A equação III.2.1.9 pode ser escrita na forma de equação diferencial:

$$\frac{\partial F}{\partial t} = K \cdot \frac{\psi \cdot \Delta\theta + F}{F} \qquad \text{(III.2.1.11)}$$

O que é idêntico a:

$$\frac{F}{F + \psi \cdot \Delta\theta} \cdot \partial F = K \cdot \partial t \qquad \text{(III.2.1.12)}$$

O que também pode ser escrito como:

$$\left[\frac{F + \psi \cdot \Delta\theta}{F + \psi \cdot \Delta\theta} - \frac{\psi \cdot \Delta\theta}{F + \psi \cdot \Delta\theta} \right] \cdot \partial F = K \cdot \partial t \qquad \text{(III.2.1.13)}$$

Integrando, vem:

$$\int_0^{F(t)} \left(1 - \frac{\psi \cdot \Delta\theta}{F + \psi \cdot \Delta\theta} \right) \cdot \partial F = \int_0^t K \cdot \partial t \qquad \text{(III.2.1.14)}$$

Primitivando, obtém-se:

$$F(t) - \psi \cdot \Delta\theta \cdot \left[\ln\left(F(t) + \psi \cdot \Delta\theta\right) - \ln\left(\psi \cdot \Delta\theta\right) \right] = K \cdot t \qquad \text{(III.2.1.15)}$$

O que é equivalente a:

$$F(t) = K \cdot t + \psi \cdot \Delta\theta \cdot \ln\left(1 + \frac{F(t)}{\psi \cdot \Delta\theta} \right) \qquad \text{(III.2.1.16)}$$

A equação III.2.1.16 é a equação de Green-Ampt para a cálculo da infiltração acumulada. Como a velocidade de infiltração é a derivada da infiltração acumulada em ordem ao tempo:

$$f(t) = \frac{\partial F(t)}{\partial t} = K \cdot \left(\frac{\psi \cdot \Delta\theta}{F(t)} + 1 \right) \qquad \text{(III.2.1.17)}$$

A equação III.2.1.16 é uma equação não linear em ordem a F não tendo solução analítica, no entanto pode ser resolvida numéricamente pelo método das substituições sucessivas ou Newton-Raphson, por exemplo.

Para a utilização desta equação é necessário conhecer a porosidade θ, porosidade efectiva θ_e, altura de sucção na frente de humedecimento ψ e conductividade hidráulica K do solo em questão. Valores difíceis de obter de forma sistematizada por toda a superfície de estudo. No entanto Raws, Brakensiek e Miller (1983) utilizando um método proposto por Raws (1981) para determinar os parâmetros da equação de Green-Ampt que se baseia na equação de Brooks-Correy. Estes autores analisaram cerca de 5000 amostras de solo para determinarem os valores médios dos parâmetros da equação de Green-Ampt. Para a porosidade e porosidade efectiva os valores obtidos não apresentam variação significativa dentro da mesma classe de solo, no entanto para a altura de sucção e conductividade hidráulica verifica-se que estes valores variam consideravelmente mesmo em amostras da mesma classe de solo. Os valores indicados no quadro III.2.1.1 são valores típicos para a respectiva classe de solo podendo na prática surgir alguma discrepância em relação aos valores "*in-situ*".

Textura do solo	**Porosidade** (adim.)	**Porosidade efectiva** (adim.)	**Altura de sucção na frente de humedecimento** (mm)	**Conductividade hidráulica** (mm/hora)
areia	0.437	0.417	49.5	117.8
(s)	0.374 - 0.500	0.354 - 0.480	9.7 - 253.6	
areia limosa	0.437	0.401	61.3	29.9
(ls)	0.363 - 0.506	0.329 - 0.473	13.5 - 279.4	
limo arenoso	0.453	0.412	110.1	10.9
(sl)	0.351 - 0.555	0.283 - 0.541	26.7 - 454.7	
limo	0.463	0.434	88.9	3.4
(l)	0.375 - 0.551	0.334 - 0.534	13.3 - 593.8	
limo siltoso	0.501	0.486	166.8	6.5
(sil)	0.420 - 0.582	0.394 - 0.578	29.2 - 953.9	

limo argiloso arenoso (scl)	0.398 0.332 - 0.464	0.330 0.235 - 0.425	218.5 44.2 - 1080.	1.5
limo argiloso (cl)	0.464 0.409 - 0.519	0.309 0.279 - 0.501	208.8 47.9 - 911.0	1.0
limo argiloso siltoso (sicl)	0.471 0.418 - 0.524	0.432 0.347 - 0.517	273.0 56.7 - 1315.0	1.0
argila arenosa (sc)	0.430 0.370 - 0.490	0.321 0.207 - 0.435	239.0 40.8 - 1402.0	0.6
argila siltosa (sic)	0.479 0.425-0.533	0.423 0.334 - 0.512	292.2 61.3 - 1394.0	0.5
argila (c)	0.475 0.427 - 0.523	0.385 0.269 - 0.501	316.3 63.9 - 1565.0	0.3

Quadro III.2.1.1 - Parâmetros para a equação de Green-Ampt [1]

O tipo de solo é determinado pela sua textura com base num ábaco triangular de texturas elaborado pelo Soil Conservation Service.

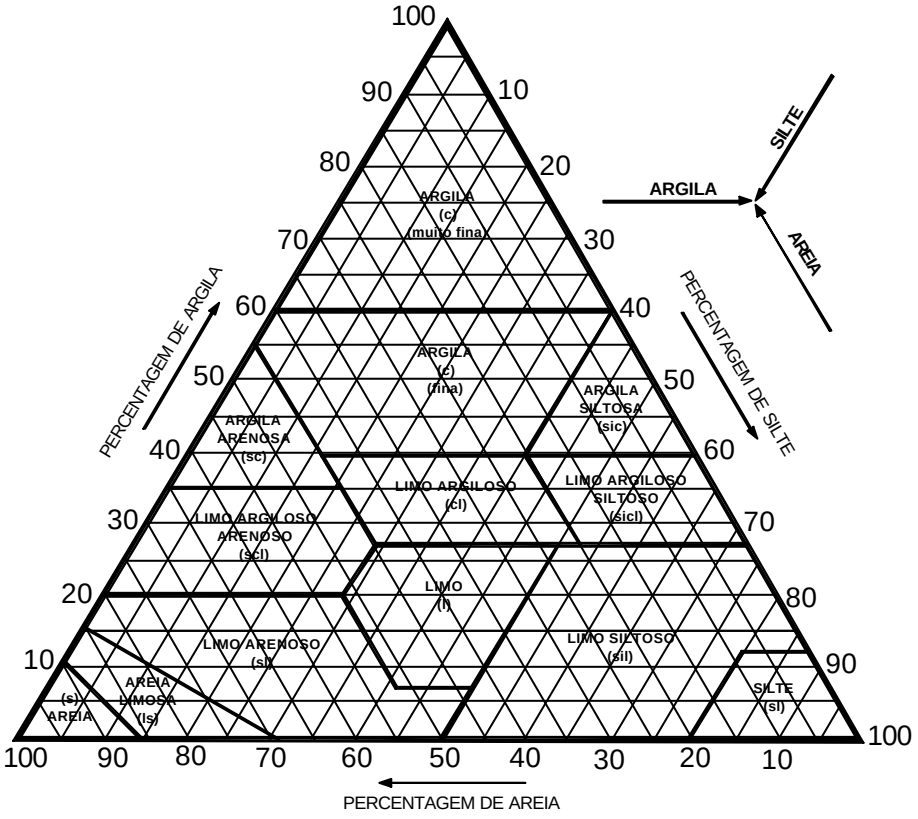


Figura III.2.1.3 - Ábaco triangular para classificação textural (SCS)[2]

[1] De acordo com Rawls, Brakensiek e Miller, 1983 citados em Chow, 1988

A formulação apresentada anteriormente admite que existe uma lâmina de água de reduzida espessura sobre a superfície do solo. Contudo esta lâmina só se forma se a intensidade de precipitação for superior à taxa potencial de infiltração máxima, ou seja a velocidade máxima a que a água se infiltra no solo.

No instante em que a chuva começa, o solo apresenta uma saturação S_e efectiva que depende da intensidade, duração e distância temporal das chuvas antecedentes. Se o solo se encontra seco no instante inicial, a capacidade de infiltração é superior à intensidade de precipitação. Nos instantes seguintes o solo humedece e a capacidade de infiltração diminui, no instante em que a capacidade de infiltração fica a baixo da intensidade de precipitação começa a existir excesso de precipitação ou seja a precipitação que contribui para o volume de água que se acumula e escorre à superfície.

A precipitação efectiva P_e será dada pela diferença entre a precipitação e a infiltração, ou seja:

$$P_e = P - F \qquad \text{(III.2.1.18)}$$

III.2.1.1 - Exemplo de utilização da equação de Green-Ampt

Em seguida representam-se para um hietograma típico (figura III.2.1.2), as curvas de intensidade de precipitação, infiltração potencial e infiltração real (figura III.2.1.5). e precipitação acumulada e infiltração acumulada (figura III.2.1.6), para um solo limo arenoso (sl), com saturação efectiva inicial de 40 % e utilizando os valores do quadro III.2.1.1 para quantificar os parâmetros do solo necessários à utilização da equação de Green-Ampt.

[2] Adaptado de Novotny, 1995

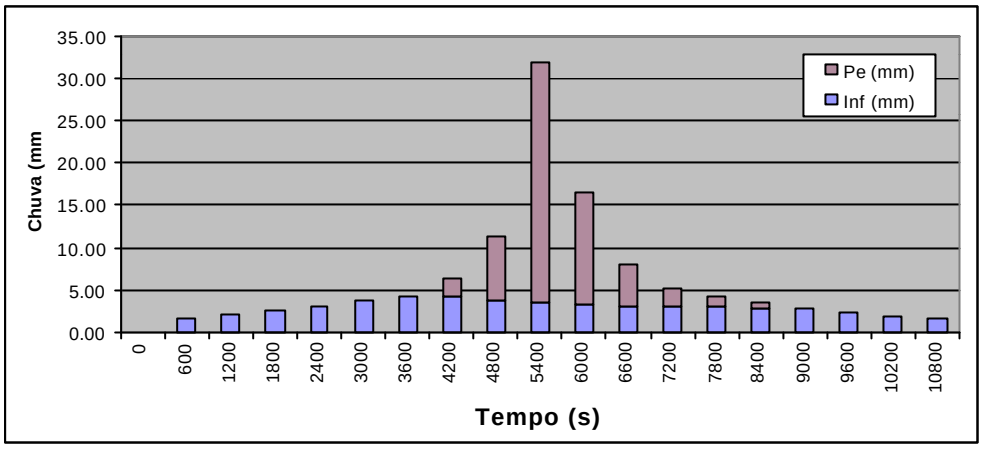


Figura III.2.1.1.1 - Precipitação/Precipitação efectiva por Green-Ampt

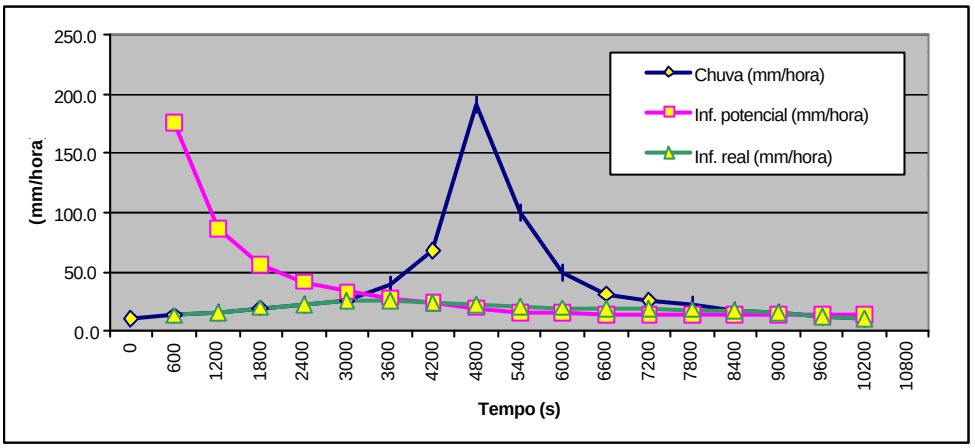


Figura III.2.1.1.2 - Taxa de precipitação / taxa de infiltração potencial / taxa de infiltração real

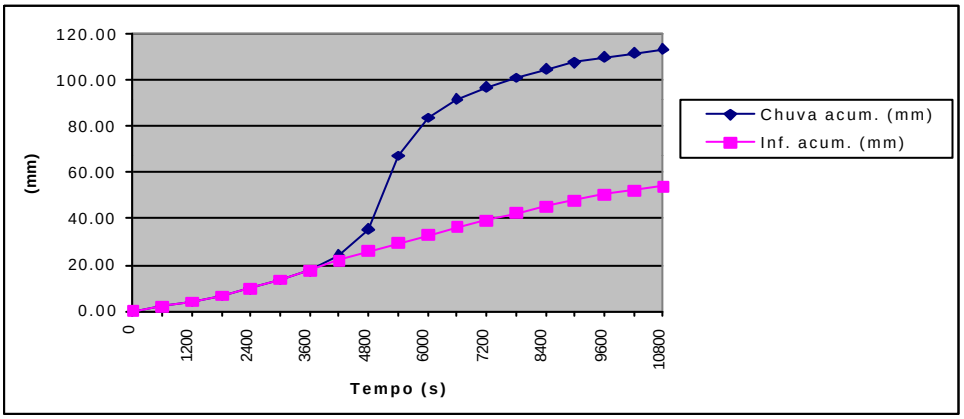


Figura III.2.1.6 - Precipitação acumulada / infiltração acumulada

III.2.1.1.3 - Método da Curva Número do Soil Conservation Service

O Soil Conservation Service apresentou em 1972 um método para calcular a precipitação efectiva P_e (parcela da precipitação que contribui para o escoamento superficial). Numa determinada chuvada a precipitação efectiva é menor do que a precipitação total P. A água retida na bacia divide-se em duas parcelas, a que é retida antes de o escoamento superficial se iniciar I_a e a que é retida depois de o escoamento se iniciar F_a. A hipótese estabelecida pelo SCS é a seguinte é a proporcionalidade entre as seguintes relações:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \qquad \text{(III.2.2.1)}$$

sendo:

F_a precipitação retida após o escoamento superficial se iniciar;

I_a precipitação retida na bacia antes do escoamento se iniciar;

S retenção máxima por infiltração ou estagnação em pequenas depressões do solo;

$$S = I_a + F_a \qquad \text{(III.2.2.2)}$$

P precipitação total;

$$P = P_e + I_a + F_a \qquad \text{(III.2.2.3)}$$

P_e precipitação efectiva;

Substituindo a equação III.2.2.3 na equação III.2.2.1, vem:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \qquad \text{(III.2.2.4)}$$

Por via experimental chegou-se à seguinte relação empírica:

$$I_a = 0.2 \cdot S \qquad \text{(III.2.2.5)}$$

Substituindo a equação III.2.2.5 em III.2.2.4, obtém-se:

$$P_e = \frac{(P - 0.2 \cdot S)^2}{P + 0.8 \cdot S} \qquad \text{(III.2.2.6)}$$

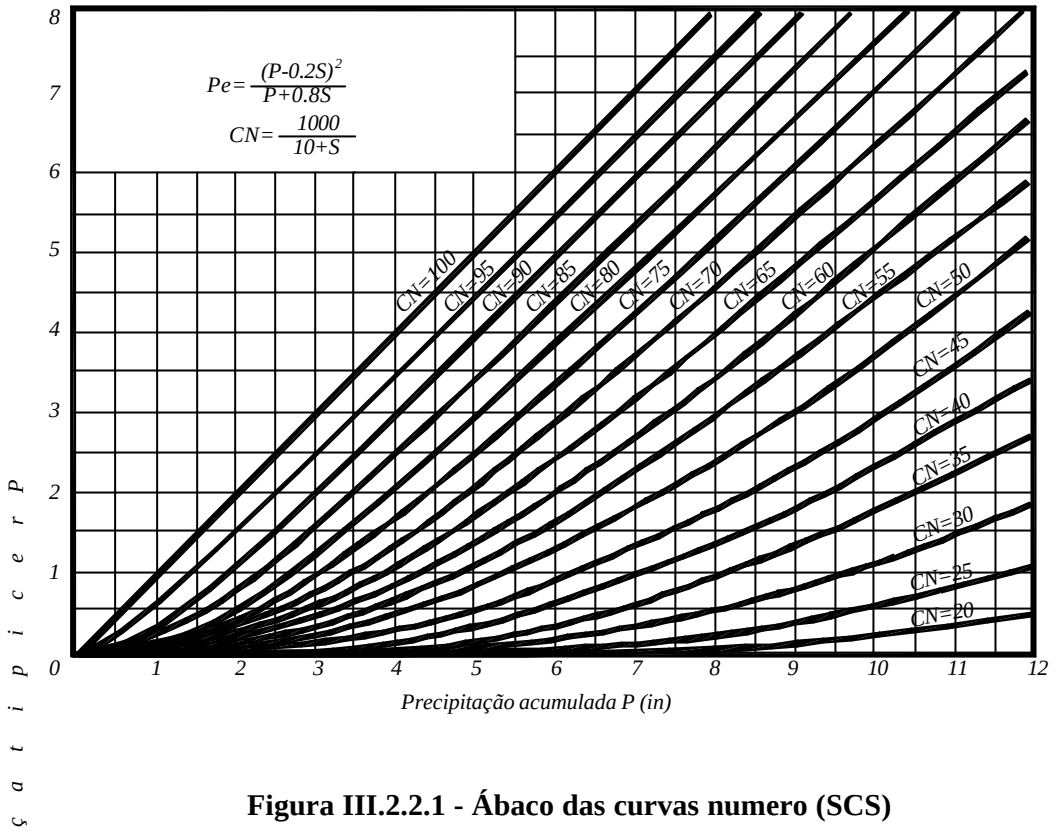


Figura III.2.2.1 - Ábaco das curvas numero (SCS)

Os técnicos do SCS determinaram por via experimental a relação entre P e P_e para diversas áreas e criaram curvas número padrão (*CN*). O valor do número de escoamento é adimensional e pode variar entre 0 e 100. Para superfícies completamente impermeáveis toma o valor 100 e para superfícies naturais, solos, toma valores menores que 100.

A relação entre a retenção máxima S e número de escoamento CN é dada por:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \qquad \text{(III.2.2.7)}$$

Substituindo a equação III.2.2.7 em III.2.2.6, vem:

$$P_e = \frac{\left(P - \frac{200}{CN} + 2\right)^2}{P + \frac{800}{CN} - 8} \qquad \text{(III.2.2.8)}$$

Como esta equação foi desenvolvida utilizando polegadas como unidade, convertendo para milímetros (1 in = 25.4 mm), obtém-se:

$$P_e = \frac{\left(P - \frac{5080}{CN} + 50.8\right)^2}{P + \frac{20320}{CN} - 203.2} \qquad \text{(III.2.2.9)}$$

O valor de CN para vários tipos de solos e respectiva ocupação foi determinado por via experimental. Os solos são divididos em quatro grupos hidrológicos, A, B, C e D:

A - Baixo potencial de deflúvio. Terrenos muito permeáveis com pouco silte e argila. Os valores mais baixos de CN estão dentro deste tipo.

B - Capacidade de infiltração acima da média após completo humedecimento. Solos arenosos menos profundos que os do tipo A.

C - Capacidade de infiltração abaixo da média depois de pré-saturação. Contém apreciável percentagem de argila.

D - Mais alto potencial de deflúvio. Muito argiloso, quase impermeável. Os valores mais altos de CN estão dentro deste tipo.

Textura do solo	Taxa de infiltração mínima (mm/hora)	Grupo de solo (SCS)
areia (s)	210.06	A
areia limosa (ls)	61.21	A
limo arenoso (sl)	25.91	B
limo (l)	13.21	B
limo siltoso (sil)	6.86	C
limo argiloso arenoso (scl)	4.32	C
limo argiloso (cl)	2.29	D
limo argiloso siltoso (sicl)	1.52	D
argila arenosa (sc)	1.27	D
argila siltosa (sic)	1.02	D
argila (c)	0.51	D

Quadro III.2.2.1 - Grupos de solo segundo o SCS [3]

Com base no quadro III.2.2.1 é possível elaborar um ábaco triangular que relaciona a textura do solo com o seu grupo hidrológico.

[3] Segundo Raws et all, 1982 em Thomas N. Debo, 1995

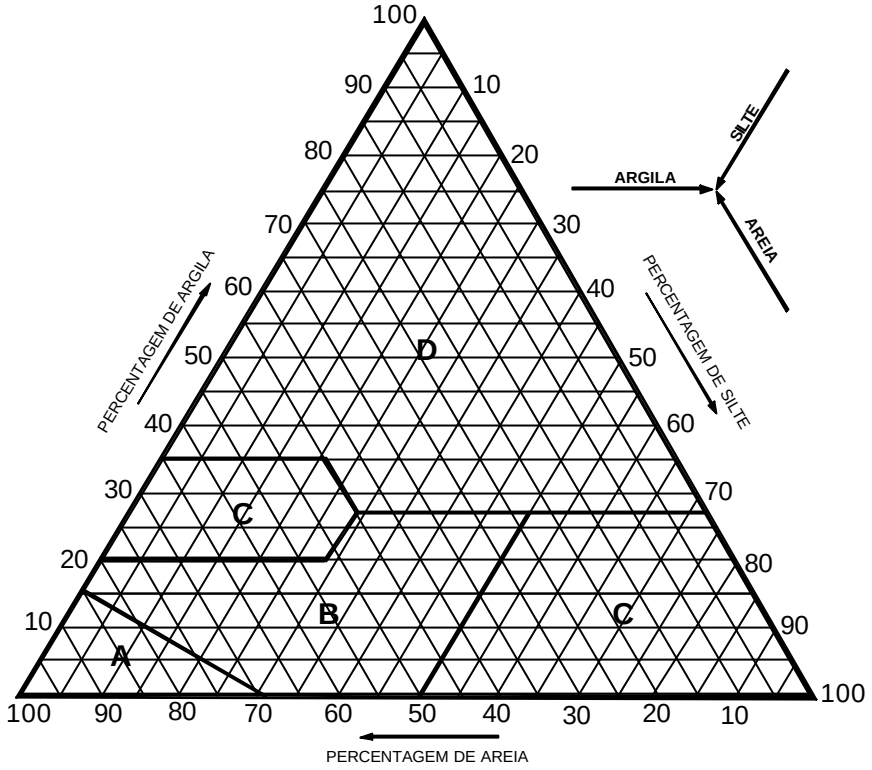


Figura III.2.2.2 - Ábaco triangular para a classificação do grupo hidrológico de solo[4]

[4] Elaborado com base em Raws et all, 1982 em Thomas N. Debo, 1995

Valores do número de escoamento para regiões rurais - CN					
Utilização ou cobertura do solo	**Condições de superficie**	**Tipo de solo**			
		A	B	C	D
Solo lavrado		77	86	91	94
Culturas arvenses	segundo maior declive	64	76	84	88
	segundo curvas de nível	62	74	82	85
	segundo as curvas de nível e em terraços	60	71	79	82
Rotações de cultura	segundo maior declive	62	75	83	87
	segundo curvas de nível	60	72	81	84
	segundo as curvas de nível e em terraços	57	70	78	82
Pastagens	pobre	68	79	86	89
	normal	49	69	79	84
	boa	39	61	74	80
	pobre, segundo as curvas de nível	47	67	81	88
	normal, segundo as curvas de nível	25	59	75	83
	boa, segundo as curvas de nível	6	35	70	79
Prado permanente	normal	30	58	71	78
Zonas sociais rurais	normal	59	74	82	86
Estradas	pavimento permeável	72	82	87	89
	pavimento impermeável	74	84	90	92
Florestas	muito abertas ou de baixa transpiração	56	75	86	91
	abertas ou de baixa transpiração	46	68	78	84
	normal	36	60	70	76
	densas ou de alta transpiração	26	52	62	69
	muito densas ou de alta transpiração	15	44	54	61
Superficie impermeável		100	100	100	100

Quadro III.2.2.2 - Classificação do CN (SCS)[5]

Os valores de CN obtidos conforme cada um destes grupos hidrológicos de solo e respectivos usos, deve ser corrigido por forma a contemplar a condição antecedente de humedecimento do solo. Assim existem as condições antecedentes de humidade do solo, "*Antecedent Moisture Condition*", AMC:

[5] Adaptado de Lencastre, 1992 e Chow, 1988.

AMC I Solos secos abaixo do ponto de emurchecimento. Não devem ser considerados em estudos de caudais de cheia.

AMC II A humidade corresponde à capacidade de campo. Solo húmido dá origem a escoamentos médios.

AMC III Solo muito encharcado, quase saturado (condições de empoçamento), originado por chuvas persistentes durante pelo menos cinco dias anteriores. Situação propicia à formação das maiores cheias.

O SCS recomenda que os valores de CN sejam corrigidos, de acordo com as condições antecedentes de humidade do solo. Os valores tabelados correspondem à condição AMCII. Assim para corrigir para a condição de AMC I :

$$CN(I) = \frac{4.2 \cdot CN(AMCII)}{10 - 0.058 \cdot CN(AMCII)} \qquad \text{(III.2.2.10)}$$

Para corrigir para a condição de AMC III:

$$CN(III) = \frac{23 \cdot CN(AMCII)}{10 + 0.13 \cdot CN(AMCII)} \qquad \text{(III.2.2.11)}$$

III.2.2.1 - Exemplo de utilização do método da curva número

Para o mesmo exemplo que foi apresentado em III.2.1.1, utiliza-se o método da curva número, em que o *CN* foi escolhido por forma a que a infiltração acumulada no final da chuvada fosse idêntica à obtida pela equação de Green-Ampt. Nesta condição o CN determinado foi 79.

Pode-se verificar, de acordo com os resultados obtidos que para igual valor de infiltração total acumulada no fim do tempo de cálculo, no método da Curva Número, esta é mais mal distribuída no tempo, com tendência para acompanhas as variações do hietograma, enquanto a taxa de infiltração calculada com base na equação de Green-Ampt, a taxa de infiltração tende a estabilizar após algum tempo em que a um aumento da intensidade de precipitação, corresponde um aumento da taxa de precipitação efectiva gerada, superior ao que seria determinado pelo método da Curva Número.

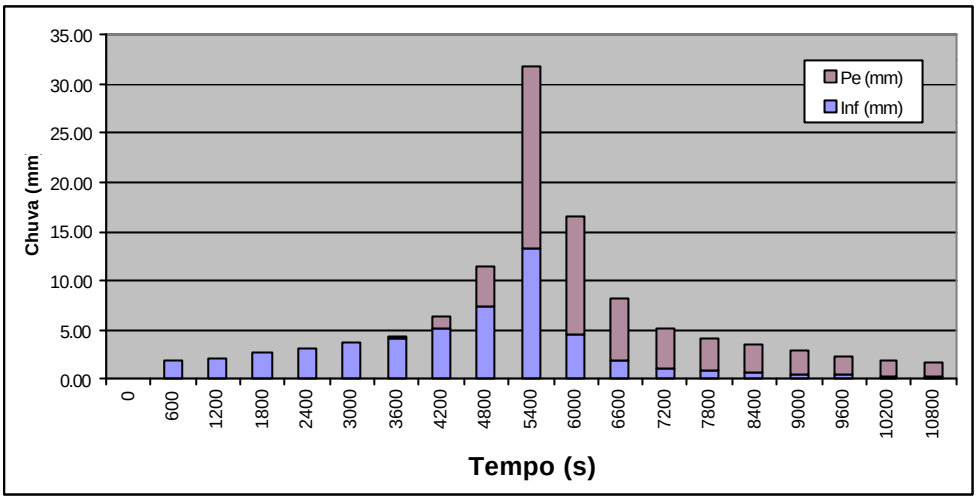


Figura III.2.2.3 - Precipitação / precipitação efectiva pela curva número

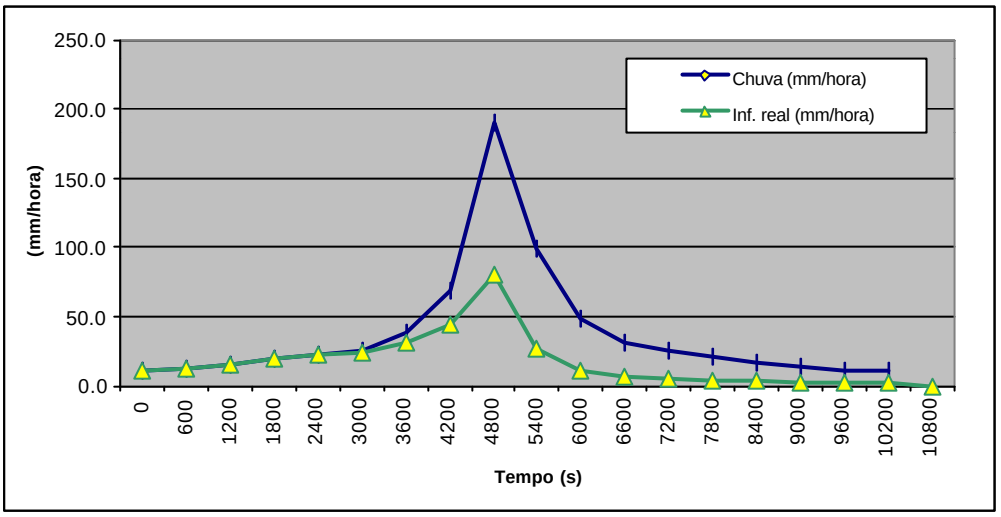


Figura III.2.2.4 - Taxa de precipitação / taxa de infiltração

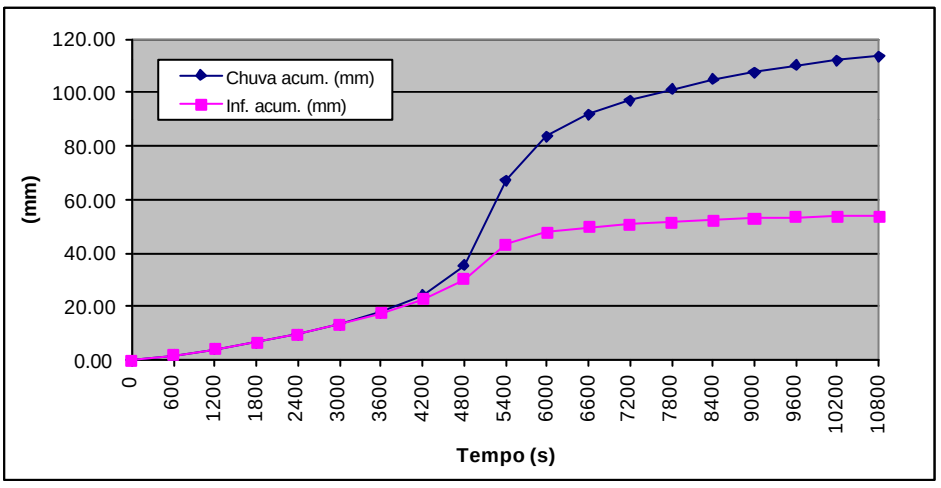


Figura III.2.2.5 - Precipitação acumulada / infiltração acumulada

III.3 - Caudais de percurso

Assume-se que a rede hidrográfica é alimentada por caudais de percurso, uniformemente distribuídos ao longo de cada troço da rede hidrográfica e que são originados pelo excesso de precipitação gerado na célula a montante do respectivo troço.

O caudal de percurso de um determinado troço da rede hidrográfica num determinado instante é dado por:

$$q_{p_{ic}}^{j} = \frac{Pe_{No1(ic)}^{j} \cdot Dx \cdot Dy}{3600 \cdot 1000 \cdot L_{ic}} \qquad \text{(III.3.1)}$$

sendo:

q_p	caudal de percurso ($m^3/s/m$);
$P_{e\,No1(ic)}^{j}$	precipitação efectiva no instante *j*, no nó 1 do troço *ic*, (mm/hora);
Dx	dimensão x da célula (m);
Dy	dimensão y da célula (m);
L_{ic}	comprimento do troço *ic* (m).

IV - Equações de Saint-Venant

O escoamento da água sobre o solo é um processo distribuído, porque o caudal, velocidade e altura da lâmina de água variam no tempo e no espaço. O cálculo destas variáveis pode ser efectuado através das equações de Saint-Venant. Estas são equações diferenciais às derivadas parciais, que permitem o cálculo do caudal e da altura da lâmina de água como funções do tempo e do espaço.

A dedução das equações de Saint-Venant baseia-se nos seguintes pressupostos:

- O escoamento é unidimensional, a profundidade e a velocidade variam só na direcção longitudinal do canal. Isto implica que a velocidade é constante e a superfície da água é horizontal numa secção perpendicular ao eixo longitudinal do canal;
- O escoamento varia gradualmente ao longo do canal, podendo-se desprezar as acelerações verticais e considerar a distribuição de pressões segundo a vertical hidrostática;
- O eixo longitudinal do canal é aproximadamente uma linha recta;
- O declive do fundo é pequeno e o fundo não é móvel, ou seja os efeitos do destacamento e deposição não influenciam o escoamento;
- Os coeficientes de rugosidade para o regime permanente e uniforme são aplicáveis, sendo válidas as equações de Manning ou Chézy para os quantificar.
- O fluido é incompressível e com densidade constante.

IV.1. Equação da continuidade

Considerando um volume de controlo elementar, com um comprimento fixo *dx*, conforme esquematizado nas figuras IV.1.1, IV.1.2 e IV.1.3.

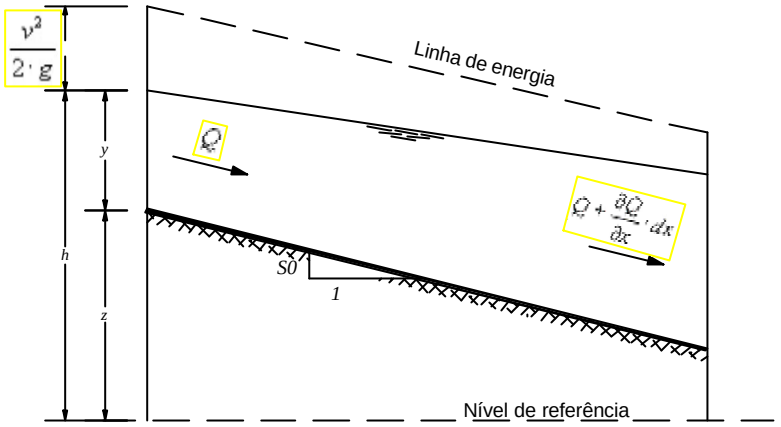


Figura IV.1.1 - Volume de controlo (Perfil longitudinal)

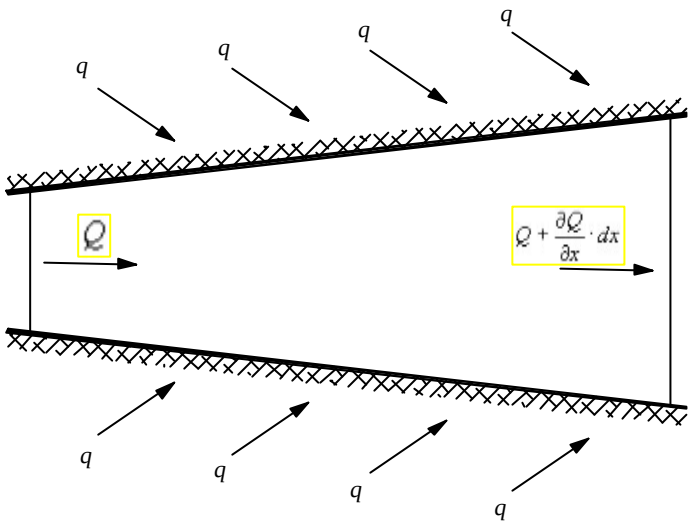


Figura IV.1.2 - Volume de controlo (Planta)

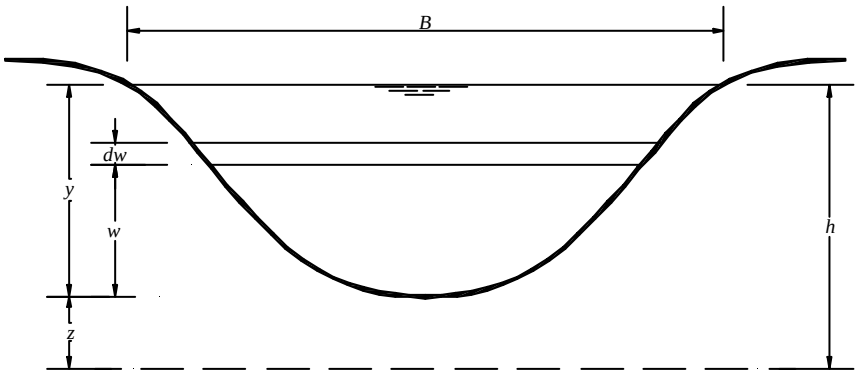


Figura IV.1.3 - Volume de controlo (Perfil transversal)

O caudal que entra no volume de controlo é a soma do caudal Q que entra pela secção de montante com o caudal de percurso q que entra lateralmente. O caudal q é dado em $m^3/s/m$ assim o caudal total de percurso é dado por:

$$q \cdot dx \tag{IV.1.1}$$

então a entrada de massa para o volume de controlo é dada por:

$$\iint_{entrada} \rho \cdot V \cdot dA = -\rho \cdot (Q + q \cdot dx) \tag{IV.1.2}$$

O sinal negativo aparece porque os caudais de entrada são considerados negativos no teorema de transporte de Reynolds. A massa que sai do volume é dada por:

$$\iint_{saida} \rho \cdot V \cdot dA = \rho \cdot \left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \cdot dx \right) \tag{IV.1.3}$$

em que:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} \tag{IV.1.4}$$

representa a variação do caudal no volume de controlo ao longo da distância. O volume do elemento é dado por:

$$A \cdot dx \tag{IV.1.5}$$

sendo A a área média da secção transversal. Assim a variação da massa armazenada no volume de controlo é dada por:

$$\frac{d}{dt} \cdot \iiint \rho \cdot d\forall = \frac{\partial (\rho \cdot A \cdot dx)}{\partial t} \tag{IV.1.6}$$

A saída de massa do volume de controlo é calculada por:

$$\frac{\partial (\rho \cdot A \cdot dx)}{\partial t} - \rho \cdot (Q + q \cdot dx) + \rho \cdot \left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \cdot dx \right) = 0 \tag{IV.1.7}$$

Ou seja a soma da massa que sai com a variação no interior volume de controlo é igual á massa que entra.

Assumindo que a densidade do fluido ρ é constante, a equação IV.1.7 pode ser dividida por $\rho \cdot dx$, de onde se obtém a equação da conservação da massa:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \tag{IV.1.8}$$

IV.2. Equação da conservação da quantidade de movimento

A segunda equação de Newton:

$$F = \frac{\partial P}{\partial t} \qquad \text{(IV.2.1)}$$

em que:

F força;

P quantidade de movimento;

t tempo.

pode ser escrita na forma do teorema de transporte de Reynolds:

$$\sum F = \frac{d}{dt} \cdot \iiint V \cdot \rho \cdot d\forall + \iint V \cdot \rho \cdot V \cdot dA \qquad \text{(IV.2.2)}$$

A equação anterior mostra que o somatório das forças aplicadas na massa de fluido contida no interior do volume de controlo é igual á variação da quantidade de movimento no interior do volume de controlo mais a quantidade de movimento que sai do referido volume.

As forças que actuam sobre o fluido contido no volume de controlo são:

F_g força gravitica;

F_f força de atrito com o fundo e laterais do volume de controlo;

F_e força de contracção ou expansão causada por variações bruscas da geometria do canal;

F_w força do vento na superfície do fluido;

F_p diferença de pressão.

A componente da força gravitica que actua sobre o fluido no interior do volume de controlo segundo a direcção do escoamento é determinada como o produto do peso volúmico pelo volume do fluido pelo seno do ângulo que o fundo faz com a horizontal. Para inclinações pequenas, o seno é aproximadamente igual à tangente:

$$F_g = \rho \cdot g \cdot A \cdot dx \cdot \sin\theta \approx \rho \cdot g \cdot A \cdot S_0 \cdot dx \qquad \text{(IV.2.3)}$$

A força de atrito causada pelo esforço transverso ao longo do fundo e lados do volume de controlo é dada por:

$$-\tau_0 \cdot P \cdot dx \qquad \text{(IV.2.4)}$$

sendo:

τ_0 tensão tangencial ou de arrastamento;

P perímetro molhado;

dx comprimento do volume de controlo.

A tensão tangencial ou de arrastamento τ_0 é calculada por:

$$\tau_0 = \gamma \cdot R \cdot S_f \qquad \text{(IV.2.5)}$$

sendo:

γ peso volúmico do fluido;

R raio hidráulico;

S_f declive da linha de energia.

como o peso volúmico é dado por:

$$\gamma = \rho \cdot g \qquad \text{(IV.2.6)}$$

e o raio hidráulico define-se como:

$$R = \frac{A}{P} \qquad \text{(IV.2.7)}$$

substituindo na equação IV.2.5, a tensão tangencial define-se como:

$$\tau_0 = \rho \cdot g \cdot \frac{A}{P} \cdot S_f \qquad \text{(IV.2.8)}$$

assim a força resultante devido ao atrito é calculada por:

$$F_f = -\rho \cdot g \cdot A \cdot S_f \cdot dx \qquad \text{(IV.2.9)}$$

Expansões ou contracções bruscas do canal provocam perdas de energia devido a remoinhos. Essas perdas são proporcionais à variação da energia cinética ao longo do comprimento do canal:

$$E_c = \frac{V^2}{2 \cdot g} = \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot A^2} \qquad \text{(IV.2.10)}$$

As forças que causam essa perda de carga são calculadas por:

$$F_e = -\rho \cdot g \cdot A \cdot S_e \cdot dx \qquad \text{(IV.2.11)}$$

sendo S_e a perda de carga devida à expansão ou contracção. S_e é calculado pela seguinte expressão:

$$S_e = \frac{K_e}{2 \cdot g} \cdot \frac{\partial \left(\frac{Q}{A} \right)^2}{\partial x} \qquad \text{(IV.2.12)}$$

em que:

K_e factor de expansão ou contracção, negativo para expansões e positivo para contracções;

O efeito do vento é causado pela fricção entre o ar e a superfície livre do volume de controlo e é dado por:

$$F_w = \boldsymbol{t}_w \cdot B \cdot dx \qquad \text{(IV.2.13)}$$

sendo:

$\boldsymbol{t}_w$ tensão tangencial entre o ar e a superfície livre do volume de controlo;

B largura superficial da secção transversal.

A tensão tangencial numa fronteira de um fluido pode ser escrita como:

$$\boldsymbol{t}_w = \frac{-\boldsymbol{r} \cdot C_f \cdot |V_r| \cdot V_r}{2} \qquad \text{(IV.2.14)}$$

sendo:

V_r velocidade relativa entre o fluido e o ar;

C_f coeficiente da tensão tangencial entre o fluido e o ar;

Como a velocidade média do escoamento é dada por:

$$U = \frac{Q}{A} \qquad \text{(IV.2.15)}$$

e designando a velocidade do vento por V_w , a velocidade relativa entre o ao e o fluido é calculada por:

$$V_r = \frac{Q}{A} - V_w \cdot \cos(\boldsymbol{n}) \qquad \text{(IV.2.16)}$$

em que:

$\boldsymbol{n}$ é o ângulo formado entre a direcção do vento e a direcção do escoamento;

Assim a força resultante da acção do vento sobre o fluido contido no volume de controlo é dada por:

$$F_w = \frac{-\boldsymbol{r} \cdot C_f \cdot |V_r| \cdot V_r}{2} \cdot B \cdot dx \qquad \text{(IV.2.17)}$$

chamando:

$$W_f = \frac{C_f \cdot |V_r| \cdot V_r}{2} \qquad \text{(IV.2.18)}$$

resulta:

$$F_w = -W_f \cdot \boldsymbol{r} \cdot B \cdot dx \qquad \text{(IV.2.19)}$$

A resultante devido à diferença de pressões hidrostáticas entre a secção de montante a e secção de jusante do volume de controlo e à contracção ou expansão do canal, é determinada por:

$$F_p = F_{pm} - F_{pj} + F_{pl} \qquad \text{(IV.2.20)}$$

sendo:

F_{pm} resultante da pressão hidrostática actuante na secção de montante;

F_{pj} resultante da pressão hidrostática actuante na secção de jusante;

F_{pl} resultante da pressão hidrostática segundo a direcção do escoamento nas laterais do volume de controlo;

De acordo com a figura IV.1.3, um elemento de altura *dw* a uma altura *w* medida a partir do fundo do canal e a uma profundidade *y-w*, está sujeito a uma pressão hidrostática:

$$\boldsymbol{r} \cdot g \cdot (y - w) \qquad \text{(IV.2.21)}$$

e consequentemente uma força hidrostática dada por:

$$\boldsymbol{r} \cdot g \cdot (y - w) \cdot b \cdot dw \qquad \text{(IV.2.22)}$$

Assim, a força hidrostática actuante na secção de montante do volume de controlo é dada por:

$$F_{pm} = \int_0^y \boldsymbol{r} \cdot g \cdot (y - w) \cdot b \cdot dw \qquad \text{(IV.2.23)}$$

Consequentemente a resultante das pressões hidrostáticas actuantes na secção de jusante do volume de controlo é dada por:

$$F_{pj} = F_{pm} + \frac{\partial F_{pm}}{\partial x} \cdot dx \qquad \text{(IV.2.24)}$$

Aplicando a regra de Leibnitz para a primitivação de um integral, vem:

$$\frac{\partial F_{pm}}{\partial x} = \int_0^y \boldsymbol{r} \cdot g \cdot \frac{\partial y}{\partial x} \cdot b \cdot dw + \int_0^y \boldsymbol{r} \cdot g \cdot (y - w) \cdot \frac{\partial b}{\partial x} \cdot dw \qquad \text{(IV.2.25)}$$

$$\frac{\partial F_{pm}}{\partial x} = \boldsymbol{r} \cdot g \cdot \frac{\partial y}{\partial x} + \int_0^y \boldsymbol{r} \cdot g \cdot (y - w) \cdot \frac{\partial b}{\partial x} \cdot dw \qquad \text{(IV.2.26)}$$

Como a área da secção transversal do escoamento é dada por:

$$A = \int_0^y b \cdot dw \qquad \text{(IV.2.27)}$$

A força resultante da pressão hidrostática actuante nas laterais do volume de controlo está relacionada com a variação da largura do canal:

$$\frac{\partial b}{\partial x} \qquad \text{(IV.2.28)}$$

ao longo do comprimento do volume de controlo *dx*, e é dada por:

$$F_{pl} = \left[\int_0^y \boldsymbol{r} \cdot g \cdot (y - w) \cdot \frac{\partial b}{\partial x} \cdot dw \right] \cdot dx \qquad \text{(IV.2.29)}$$

Substituindo a equação IV.2.24 na equação IV.2.20, obtem-se:

$$F_p = F_{pm} - \left(F_{pm} + \frac{\partial F_{pm}}{\partial x} \cdot dx \right) + F_{pl} \qquad \text{(IV.2.30)}$$

$$F_p = -\frac{\partial F_{pm}}{\partial x} \cdot dx + F_{pb} \qquad \text{(IV.2.31)}$$

Substituindo IV.2.26 e IV.2.29 em IV.2.31, vem:

$$F_p = -\boldsymbol{r} \cdot g \cdot A \cdot \frac{\partial y}{\partial x} \cdot dx \qquad \text{(IV.2.32)}$$

O somatório das forças actuantes no fluido contido no volume de controlo, é dada por:

$$\begin{aligned} \sum F = {} & \boldsymbol{r} \cdot g \cdot A \cdot S_0 \cdot dx - \boldsymbol{r} \cdot g \cdot A \cdot S_f \cdot dx - \boldsymbol{r} \cdot g \cdot A \cdot S_e \cdot dx \\ & - W_f \cdot B \cdot \boldsymbol{r} \cdot dx - \boldsymbol{r} \cdot g \cdot A \cdot \frac{\partial y}{\partial x} \cdot dx \end{aligned} \qquad \text{(IV.2.33)}$$

Os dois termos do lado direito da equação IV.2.33, 2ª lei de Newton escrita na forma do teorema de transporte de Reynolds, representam a variação e a saída da quantidade de movimento no volume de controlo respectivamente.

A entrada de massa no volume de controlo é dada por:

$$-\rho \cdot (Q + q \cdot dx) \tag{IV.2.34}$$

A quantidade de movimento associada é:

$$[-\rho \cdot (Q + q \cdot dx)] \cdot V \cdot \beta \tag{2.2.35}$$

sendo β um factor de correcção da quantidade de movimento ou coeficiente de Boussinesq que toma em consideração a distribuição de velocidades na secção transversal:

$$\beta = \frac{1}{V^2 \cdot A} \cdot \iint v^2 \cdot dA \tag{IV.2.36}$$

Segundo Chow 1959 e Henderson 1966, os valores de β variam entre 1.01 para canais prismáticos e 1.33 para canais naturais com margens de inundação.

Assim pode-se escrever:

$$\iint_{entrada} V \cdot \rho \cdot V \cdot dA = -\rho \cdot (\beta \cdot V \cdot Q + \beta \cdot v_x \cdot q \cdot dx) \tag{IV.2.37}$$

E a quantidade de movimento que sai do volume de controlo é dada por:

$$\iint_{saida} V \cdot \rho \cdot V \cdot dA = \rho \cdot \left[\beta \cdot V \cdot Q + \frac{\partial(\beta \cdot V \cdot Q)}{\partial x} \cdot dx \right] \tag{IV.2.38}$$

O balanço da quantidade de movimento é:

$$\iint_{\text{sup.}} V \cdot \rho \cdot V \cdot dA =$$

$$= -\rho \cdot [\beta \cdot V \cdot Q + \beta \cdot v_x \cdot q \cdot dx] + \rho \cdot \left[\beta \cdot V \cdot Q + \frac{\partial(\beta \cdot V \cdot Q)}{\partial x} \cdot dx \right] \tag{IV.2.39}$$

simplificando:

$$\iint V \cdot \rho \cdot V \cdot dA = -\rho \cdot \left[\beta \cdot v_x \cdot q - \frac{\partial(\beta \cdot V \cdot Q)}{\partial x} \right] \cdot dx \tag{IV.2.40}$$

Como o volume do elemento é:

$$A \cdot dx \tag{IV.2.41}$$

então a sua quantidade de movimento é:

$$\rho \cdot A \cdot dx \cdot V \Leftrightarrow \rho \cdot Q \cdot dx \tag{IV.2.42}$$

Assim a variação da quantidade de movimento armazenada no volume de controlo em ordem ao tempo é:

$$\frac{d}{dt}\cdot\iiint V\cdot\ \boldsymbol{r}\cdot d\forall = \boldsymbol{r}\cdot\frac{\partial Q}{\partial t}\cdot dx \qquad \text{(IV.2.43)}$$

Substituindo as forças actuantes no fluido contido no volume de controlo e os termos da quantidade de movimento na equação IV.2.2, obtém-se:

$$\boldsymbol{r}\cdot g\cdot A\cdot S_0\cdot dx-\boldsymbol{r}\cdot g\cdot A\cdot S_f\cdot dx-\boldsymbol{r}\cdot g\cdot A\cdot S_e\cdot dx-W_f\cdot B\cdot\boldsymbol{r}\cdot dx$$
$$-\boldsymbol{r}\cdot g\cdot A\cdot\frac{\partial y}{\partial x}\cdot dx=-\boldsymbol{r}\cdot\left[\boldsymbol{b}\cdot v_x-\frac{\partial(\boldsymbol{b}\cdot V\cdot Q)}{\partial x}\right]\cdot dx+\boldsymbol{r}\cdot\frac{\partial Q}{\partial t}\cdot dt \qquad \text{(IV.2.44)}$$

Dividindo toda a equação por:

$$\boldsymbol{r}\cdot dx$$

e substituindo *V* por:

$$\frac{Q}{A}$$

obtém-se a equação da quantidade de movimento na sua forma conservativa:

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial\left(\boldsymbol{b}\cdot Q^2/A\right)}{\partial x}+g\cdot A\cdot\left(\frac{\partial y}{\partial x}-S_0+S_f+S_e\right)-\boldsymbol{b}\cdot q\cdot v_x+W_f\cdot\boldsymbol{b}=0 \qquad \text{(2.2.45)}$$

Admitindo que o caudal de percurso entra no canal numa direcção perpendicular à direcção do escoamento:

$$v_x=0 \qquad \text{(2.2.46)}$$

desprezando o efeito do vento:

$$W_f=0 \qquad \text{(2.2.47)}$$

e dividindo por *A*, obtém-se:

$$\frac{1}{A}\cdot\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{1}{A}\cdot\frac{\partial}{\partial x}\cdot\left(\frac{Q^2}{A}\right)+g\cdot\frac{\partial y}{\partial x}-g\cdot\left(S_0-S_f\right)=0 \qquad \text{(2.2.48)}$$

Resumindo as equações de Saint-Venant são duas equações diferenciais às derivadas parciais, uma é a equação da continuidade (IV.1.18) e outra a equação da quantidade de movimento (IV.2.48).

Os termos da equação IV.2.48 têm os seguintes significados:

$\frac{1}{A}\cdot\frac{\partial Q}{\partial t}$ representa a aceleração local, que descreve a variação da quantidade de movimento devida a variação da velocidade em ordem ao tempo;

$\frac{1}{A}\cdot\frac{\partial}{\partial x}\cdot\left(\frac{Q^2}{A}\right)$ representa a aceleração convectiva e descreve a variação da quantidade de movimento devida a uma mudança de velocidade do escoamento ao longo do canal;

$g\cdot\frac{\partial y}{\partial x}$ representa a diferença das resultantes das pressões hidrostáticas actuantes na fronteira do volume de controlo e é proporcional à variação da profundidade do escoamento ao longo do canal;

$g\cdot S_0$ representa a acção da gravidade e é proporcional ao declive do fundo do canal;

$g\cdot S_f$ representa a acção do atrito com o fundo e as margens do canal;

Os termos da aceleração local e convectiva representam os efeitos da acção de forças inerciais no escoamento.

Quando o caudal ou a altura da lâmina de água muda num ponto num escoamento lento, os efeitos dessa perturbação propagam-se para montante. Esses efeitos são considerados no modelo distribuído pelos termos da aceleração local, convectiva ou diferença de pressão.

Utilizando um modelo sintético é impossível simular esses efeitos, pois estes modelos não possuem meios de simular este tipo de perturbações.

Existem vários modelos distribuídos que têm como base as equações de Saint-Venant, como por exemplo o *Full Equations Model*, Franz, 1997 ou o *FLDWAV*, Fread, 1998.

Empregando a equação da continuidade e considerando todos os termos da equação da quantidade de movimento, obtém-se o modelo de ONDA DINÂMICA.

Se se desprezar os termos inerciais da equação de quantidade de movimento obtém-se o modelo de INERCIA NULA.

Não considerando os termos inerciais nem os termos da diferença de pressão na equação da quantidade de movimento obtém-se o modelo de ONDA CINEMATICA.

Este modelo é aplicável quando a lâmina de água tem espessura reduzida, as forças mais importantes aplicadas ao fluido são a gravidade e o atrito e a velocidade do escoamento não varia consideravelmente, sendo a aceleração reduzida.

V - Modelo de onda cinemática

V.1 - Equações do modelo de onda cinemática

Como se demonstrou no capítulo IV, as equações que descrevem o modelo de Onda Cinemática são a equação da continuidade:

$$\frac{\partial Q}{\partial x}+\frac{\partial A}{\partial t}=q \tag{V.1.1}$$

e a equação da conservação da quantidade de movimento:

$$S_0 = S_f \tag{V.1.2}$$

A equação da conservação da quantidade de movimento pode ser escrita na seguinte forma:

$$A=\alpha \cdot Q^{b} \tag{V.1.3}$$

sendo:

A área da secção transversal do escoamento;

α, b parâmetros da equação da onda cinemática.

Com base na equação de Manning-Strickler, podem-se retirar as seguintes relações:

$$U = K_s \cdot R^{2/3} \cdot S_0^{1/2} \tag{V.1.4}$$

$$Q = K_s \cdot A \cdot \left(\frac{A}{P}\right)^{2/3} \cdot S_0^{1/2} \tag{V.1.5}$$

$$Q = K_s \cdot A^{5/3} \cdot S_0^{1/2} \cdot P^{-2/3} \tag{V.1.6}$$

$$A^{5/3} = \frac{Q \cdot P^{2/3}}{K_s \cdot S_0^{1/2}} \tag{V.1.7}$$

$$A=\left(\frac{P^{2/3}}{K_s \cdot S_0^{1/2}}\right)^{3/5} \cdot Q^{3/5} \tag{V.1.8}$$

sendo:

U velocidade média do escoamento;

K_s coeficiente de rugosidade de Manning-Strickler;

R raio hidráulico;

S_0 declive do perfil longitudinal;

P perímetro molhado;

Q caudal.

então poder-se-á introduzir os parâmetros α e β dados por:

$$\alpha = \left(\frac{P^{2/3}}{K_s \cdot S_0^{1/2}} \right) \tag{V.1.9}$$

e:

$$\beta = \frac{3}{5} \tag{V.1.10}$$

A equação V.1.8 pode ser derivada em ordem ao tempo t, do que se obtém:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \alpha \cdot \beta \cdot Q^{\beta-1} \cdot \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) \tag{V.1.11}$$

Substituindo na equação da continuidade, obtém-se a equação da onda cinemática:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \alpha \cdot \beta \cdot Q^{\beta-1} \cdot \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) = q \tag{V.1.12}$$

em que q representa o caudal de percurso.

V.2 - Celeridade da onda cinemática

A onda cinemática resulta de uma mudança de caudal. Assim um incremento no caudal dQ pode ser escrito como:

$$dQ = \frac{\partial Q}{\partial x} \cdot dx + \frac{\partial Q}{\partial t} \cdot dt \tag{V.2.1}$$

sendo:

x distância medida segundo o perfil longitudinal;

t tempo.

dividindo por dx obtém-se:

$$\frac{dQ}{dx} = \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} \cdot \frac{dt}{dx} \tag{V.2.2}$$

As equações V.2.1 e V.2.2 são idênticas se:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{\alpha \cdot \beta \cdot Q^{\beta-1}} \tag{V.2.3}$$

e

$$\frac{dQ}{dx} = q \tag{V.2.4}$$

Como:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \alpha \cdot \beta \cdot Q^{\beta-1} \cdot \left(\frac{\partial Q}{\partial t}\right) \tag{V.2.5}$$

o que é equivalente a:

$$\frac{\partial Q}{\partial A} = \frac{1}{\alpha \cdot \beta \cdot Q^{\beta-1}} \tag{V.2.6}$$

Comparando as equações V.2.3 e V.2.6, verifica-se que:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dQ}{dA} = c_k \tag{V.2.7}$$

sendo c_k a celeridade da onda cinemática.

Um observador que se desloque com uma velocidade $\frac{dx}{dt}$ verifica que o caudal aumenta um valor igual a $\frac{dQ}{dx} = q$. Se $q = 0$ este observador vê o caudal constante.

Como:

$$dA = B \cdot dy \tag{V.2.8}$$

a celeridade da onda cinemática pode ser expressa na seguinte forma:

$$c_k = \frac{1}{B} \cdot \frac{dQ}{dy} = \frac{dx}{dt} = \frac{dQ}{dA} = \frac{1}{\alpha \cdot \beta \cdot Q^{\beta-1}} \tag{V.2.9}$$

Da equação V.2.9 verifica-se que um acréscimo de caudal leva a um aumento da celeridade da onda cinemática, podendo-se fazer a representação qualitativa indicada nas figuras V.2.1, V.2.2 e V.2.3 onde se representa o hidrograma de entrada e os hidrogramas de saída para as situações de (a) não existir caudal de percurso ou (b) existir caudal de percurso.

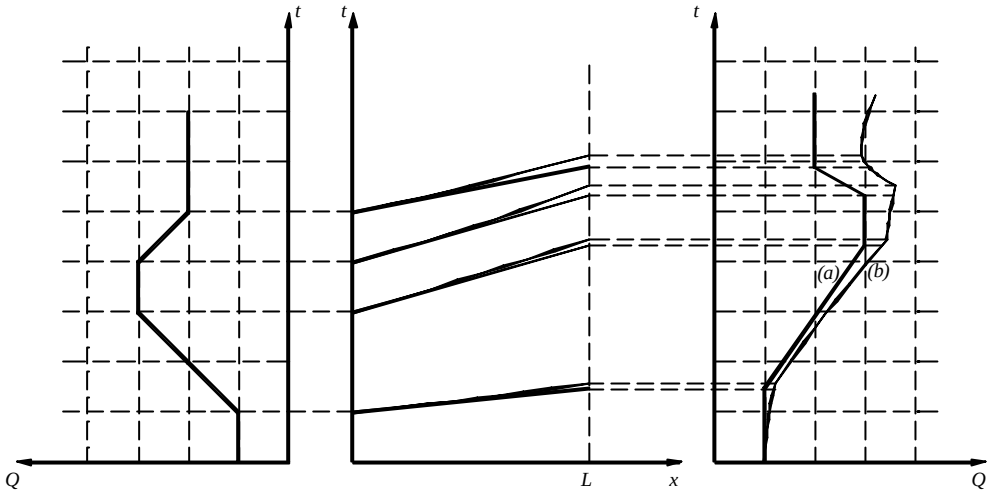


Figura V.2.1 - Hidrograma de entrada Figura V.2.2 - Curva característica Figura V.2.3 - Hidrograma de saída

Os hidrogramas de entrada e de saída são ligados pelas curvas características. A equação dessas curvas é dada por:

$$\int_0^x dx = \int_{t_0}^t c_k \cdot dt \qquad \text{(V.2.10)}$$

no caso particular de o caudal de percurso ser nulo, portanto num determinado troço de canal com propriedades constantes, e caudal constante, a celeridade da onda cinemática é constante. Nessa situação da equação V.2.10 resulta:

$$x = c_k \cdot (t - t_0) \qquad \text{(V.2.11)}$$

ou explicitando a variável *t*, resulta:

$$t = t_0 + \frac{L}{c_k} \qquad \text{(V.2.12)}$$

V.3. Resolução numérica da equação de onda cinemática

Como se demonstrou anteriormente, o modelo de onda cinemática é regido pela equação V.3.1:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \alpha \cdot \beta \cdot Q^{\beta-1} \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} = q \qquad \text{(V.3.1)}$$

O objectivo do método numérico é determinar o caudal para qualquer instante em qualquer posição, resolvendo a equação V.3.1.

Os métodos numéricos para a resolução de equações diferenciais às derivadas parciais por diferenças finitas operam numa grelha, cujos nós representam pontos discretos no contínuo espaço-tempo.

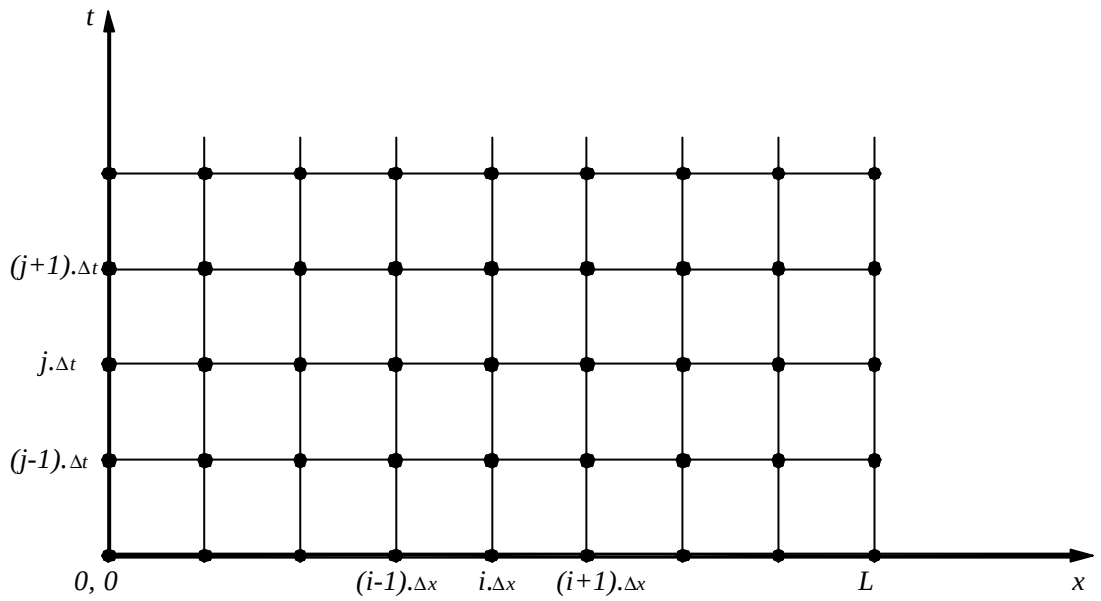


Figura V.3.1 - Grelha numérica discretizando o plano espaço-tempo

Nestes métodos as equações diferenciais às derivadas parciais são escritas sob a forma de diferenças finitas e transformadas em operadores numéricos que operam na grelha acima mencionada.

Uma função *y(x)* qualquer pode ser escrita com base nas suas derivadas pela série de Taylor:

$$y(x+\Delta x) \approx y(x) + \Delta x \cdot \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{1}{2} \cdot \Delta x^2 \cdot \frac{\partial y^2}{\partial^2 x} + \frac{1}{6} \cdot \Delta x^3 \cdot \frac{\partial y^3}{\partial^3 x} + \ldots \quad \text{(V.3.2)}$$

$$y(x-\Delta x) \approx y(x) - \Delta x \cdot \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{1}{2} \cdot \Delta x^2 \cdot \frac{\partial y^2}{\partial^2 x} - \frac{1}{6} \cdot \Delta x^3 \cdot \frac{\partial y^3}{\partial^3 x} + \ldots \quad \text{(V.3.3)}$$

A diferença centrada é dada por:

$$y(x+\Delta x) - y(x-\Delta x) \approx 2 \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial y}{\partial x} + 0(\Delta x^3) \quad \text{(V.3.4)}$$

desprezando os termos de ordem superior:

$$0(\Delta x^3) \approx 0 \quad \text{(V.3.5)}$$

a diferença centrada é dada por:

$$\frac{\partial y}{\partial x} \approx \frac{y(x+\Delta x) - y(x-\Delta x)}{2 \cdot \Delta x} \tag{V.3.6}$$

cuja aproximação é de segunda ordem

A diferença progressiva é dada por:

$$y(x+\Delta x) - y(x) = \Delta x \cdot \frac{\partial y}{\partial x} + 0(\Delta x^2) \tag{V.3.7}$$

desprezando os termos de ordem superior:

$$0(\Delta x^2) \approx 0 \tag{V.3.8}$$

vem:

$$\frac{\partial y}{\partial x} \approx \frac{y(x+\Delta x) - y(x)}{\Delta x} \tag{V.3.9}$$

cuja aproximação é de primeira ordem.

A diferença regressiva é dada por:

$$y(x) - y(x-\Delta x) = \Delta x \cdot \frac{\partial y}{\partial x} + 0(\Delta x^2) \tag{V.3.10}$$

desprezando os termos de ordem superior:

$$0(\Delta x^2) \approx 0 \tag{V.3.11}$$

vem:

$$\frac{\partial y}{\partial x} \approx \frac{y(x) - y(x-\Delta x)}{\Delta x} \tag{V.3.12}$$

cuja aproximação é de primeira ordem.

Para a resolução numérica por diferenças finitas da equação da Onda Cinemática, são utilizados dois métodos numéricos distintos.

O primeiro designado por método linear é menos robusto e os resultados são afectados pela relação $\frac{\Delta t}{\Delta x}$, podendo surgir acumulação de erros para valores muito altos desta relação.

Os resultados obtidos pelo método linear são usados como ponto de partida para o método não linear. Os resultados vindos do método não linear não são afectados pela

estimativa inicial, apenas o tempo de cálculo é afectado. Pode ser tomado um vasto leque de valores de $\frac{\Delta t}{\Delta x}$, sem que sejam introduzidos erros no resultado obtido.

Li, Simons e Stevens, 1975 mediante uma análise de estabilidade, concluíram que o método não linear para a resolução da equação da onda cinemática é incondicionalmente estável (referido em Chow, 1988).

V.3.1 - Método linear

Os termos da equação V.3.1.1:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \alpha \cdot \beta \cdot Q^{\beta-1} \cdot \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) = q \qquad \text{(V.3.1.1)}$$

podem ser escritos na forma de diferenças finitas por:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} \approx \frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^{j+1}}{\Delta x} \qquad \text{(V.3.1.2)}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} \approx \frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_{i+1}^{j}}{\Delta t} \qquad \text{(V.3.1.3)}$$

$$Q \approx \frac{Q_i^{j+1} - Q_{i+1}^{j}}{2} \qquad \text{(V.3.1.4)}$$

$$q \approx \frac{q_{i+1}^{j+1} + q_{i+1}^{j}}{2} \qquad \text{(V.3.1.5)}$$

Substituindo na equação V.3.1.1, obtém-se:

$$\left[\frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^{j+1}}{\Delta x} \right] + \alpha \cdot \beta \cdot \left[\frac{Q_i^{j+1} - Q_{i+1}^{j}}{2} \right]^{\beta-1} \cdot \left[\frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_{i+1}^{j}}{\Delta t} \right] = \left[\frac{q_{i+1}^{j+1} + q_{i+1}^{j}}{2} \right] \qquad \text{(V.3.1.6)}$$

$$\frac{Q_{i+1}^{j+1}}{\Delta x} - \frac{Q_i^{j+1}}{\Delta x} + \frac{\alpha \cdot \beta}{\Delta t} \cdot \left[Q_i^{j+1} + Q_{i+1}^{j} \right]^{\beta-1} \cdot Q_{I+1}^{J+1} - \alpha \cdot \beta \cdot \left[\frac{Q_I^{J+1} + Q_{I+1}^{J}}{2} \right]^{\beta-1} \cdot \frac{Q_{I+1}^{J}}{\Delta t} = \frac{q_{i+1}^{j+1} + q_{i+1}^{j}}{2} \qquad \text{(V.3.1.7)}$$

$$Q_{i+1}^{j+1} + \frac{\Delta x}{\Delta t} \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \left[\frac{Q_i^{j+1} + Q_{i+1}^{j}}{2} \right]^{\beta-1} \cdot Q_{i+1}^{j+1} = \Delta x \cdot \frac{q_{i+1}^{j+1} + q_{i+1}^{j}}{2} + \alpha \cdot \beta \cdot \left[\frac{Q_i^{j+1} + Q_{i+1}^{j}}{2} \right]^{\beta-1} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} \cdot Q_{i+1}^{j} + Q_i^{j+1} \qquad \text{(V.3.1.8)}$$

$$Q_{i+1}^{j+1} \cdot \left[1 + \frac{\Delta x}{\Delta t} \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \left[\frac{Q_i^{j+1} + Q_{i+1}^{j}}{2} \right]^{\beta-1} \right] = \frac{q_{i+1}^{j+1} + q_{i+1}^{j}}{2} \cdot \Delta x + \frac{\Delta x}{\Delta t} \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \left[\frac{Q_i^{j+1} + Q_{i+1}^{j}}{2} \right]^{\beta-1} \cdot Q_{i+1}^{j} + Q_i^{j+1}$$

(V.3.1.9)

$$Q_{i+1}^{j+1}\cdot\left[\frac{\Delta t}{\Delta x}+a\cdot b\cdot\left[\frac{Q_i^{j+1}+Q_{i+1}^{j}}{2}\right]^{b-1}\right]=\frac{q_{i+1}^{j+1}+q_{i+1}^{j}}{2}\cdot\Delta t+a\cdot b\cdot\left[\frac{Q_i^{j+1}+Q_{i+1}^{j}}{2}\right]^{b-1}\cdot Q_{i+1}^{j}+Q_i^{j+1}\cdot\frac{\Delta t}{\Delta x}$$

(V.3.1.10)

$$Q_{i+1}^{j+1}=\frac{\dfrac{q_{i+1}^{j+1}+q_{i+1}^{j}}{2}\cdot\Delta t+\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b}\cdot\left[\dfrac{Q_i^{j+1}+Q_{i+1}^{j}}{2}\right]\cdot Q_{i+1}^{j}+Q_i^{j+1}+Q_i^{j+1}\cdot\dfrac{\Delta t}{\Delta x}}{\dfrac{\Delta t}{\Delta x}+\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b}\cdot\left[\dfrac{Q_i^{j+1}+Q_{i+1}^{j}}{2}\right]^{b-1}}\qquad\text{(V.3.1.11)}$$

A equação V.3.1.11 é o operador numérico que permite determinar Q_{i+1}^{j+1} em função de Δt, Δx, Q_{i+1}^{j}, Q_i^{j+1}, q_{i+1}^{j+1} e q_{i+1}^{i}. Como Δt e Δx são constantes em toda a grelha. Os caudais de percurso q_{i+1}^{j+1} e q_{i+1}^{j} são previamente determinados. Assim para cada nível de tempo *j* são percorridas todas as posições *i*, determinando o caudal Q_{i+1}^{j+1}.

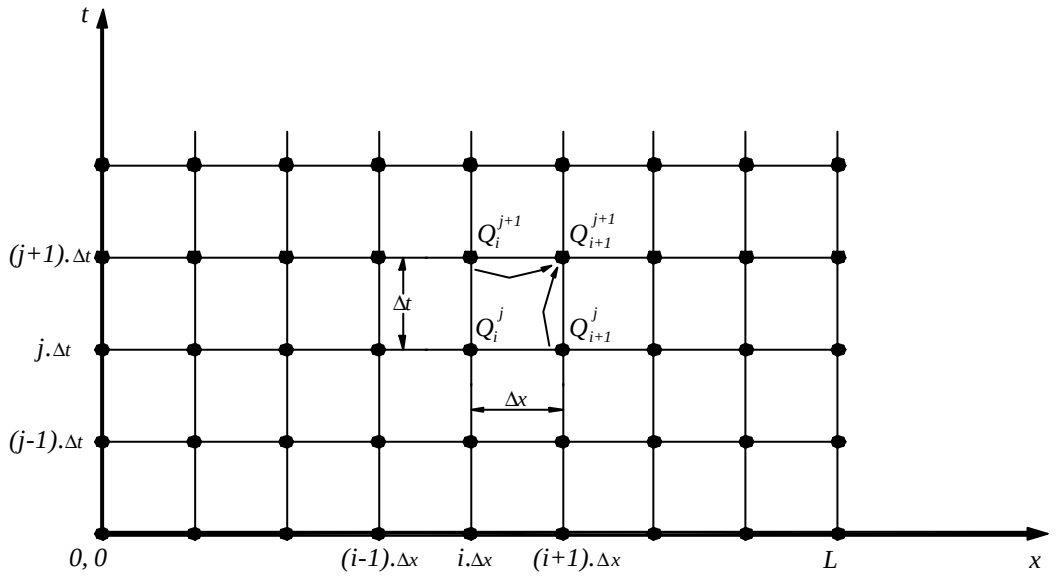


Figura V.3.1.1 - Operador numérico linear

Este operador é fácil de implementar, mas apresenta alguns problemas de instabilidade. Ou seja os resultados obtidos variam com o valor da relação $\Delta t/\Delta x$. Por isso utilizou-se um método explicito não linear, cujos valores de partida são dados pelos resultados do método explícito linear apresentado neste ponto.

V.3.2 - Método não linear

Como foi visto no ponto V.3, a equação da continuidade é:

$$\frac{\partial Q}{\partial x}+\frac{\partial A}{\partial t}=q \qquad \text{(V.3.2.1)}$$

esta equação pode ser escrita sob a forma de diferenças finitas:

$$\frac{Q_{i+1}^{j+1}-Q_{i}^{j+1}}{\Delta x}+\frac{A_{i+1}^{j+1}-A_{i+1}^{j}}{\Delta t}=\frac{q_{i+1}^{j+1}+q_{i+1}^{j}}{2} \qquad \text{(V.3.2.2)}$$

de acordo com a equação V.1.8:

$$A=\alpha\cdot Q^{\beta} \qquad \text{(V.3.2.3)}$$

podem-se escrever as seguintes relações:

$$A_{i+1}^{j+1}=\alpha\cdot\left(Q_{i+1}^{j+1}\right)^{\beta} \qquad \text{(V.3.2.4)}$$

$$A_{i+1}^{j}=\alpha\cdot\left(Q_{i+1}^{j}\right)^{\beta} \qquad \text{(V.3.2.5)}$$

em que, como foi visto anteriormente:

$$\beta=\frac{3}{5} \qquad \text{(V.3.2.6)}$$

e:

$$\alpha=\left(\frac{P_h^{2/3}}{k\cdot S_0^{1/2}}\right)^{\beta} \qquad \text{(V.3.2.7)}$$

substituindo na equação V.3.2.2, obtém-se:

$$\frac{Q_{i+1}^{j+1}-Q_{i}^{j+1}}{\Delta x}+\frac{\alpha\cdot\left(Q_{i+1}^{j+1}\right)^{\beta}-\alpha\cdot\left(Q_{i+1}^{j}\right)^{\beta}}{\Delta t}=\frac{q_{i+1}^{j+1}+q_{i+1}^{j}}{2} \qquad \text{(V.3.2.8)}$$

$$\frac{\Delta t}{\Delta x}\cdot Q_{i+1}^{j+1}-\frac{\Delta t}{\Delta x}\cdot Q_{i}^{j+1}+\alpha\cdot\left(Q_{i+1}^{j+1}\right)^{\beta}-\alpha\cdot\left(Q_{i+1}^{j}\right)^{\beta}=\Delta t\cdot\left(\frac{q_{i+1}^{j+1}+q_{i+1}^{j}}{2}\right) \qquad \text{(V.3.2.9)}$$

$$\left\{\frac{\Delta t}{\Delta x}\cdot Q_{i+1}^{j+1}+\alpha\cdot\left(Q_{i+1}^{j+1}\right)^{\beta}\right\}=\left\{\frac{\Delta t}{\Delta x}\cdot Q_{i}^{j+1}+\alpha\cdot\left(Q_{i+1}^{j}\right)^{\beta}+\Delta t\cdot\left(\frac{q_{i+1}^{j+1}+q_{i+1}^{j}}{2}\right)\right\} \qquad \text{(V.3.2.10)}$$

Na equação V.3.2.10 as variáveis do membro esquerdo da equação são desconhecidas, enquanto todas as variáveis que aparecem no membro direito da equação são conhecidas. Assim pode-se igualar o membro direito da equação a uma variável *C*:

$$C = \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot Q_i^{j+1} + \alpha \cdot \left(Q_{i+1}^{j}\right)^{b} + \Delta t \cdot \left(\frac{q_{i+1}^{j+1} + q_{i+1}^{j}}{2} \right) \qquad \text{(V.3.2.11)}$$

e definir uma função *f* , tal que:

$$f\left(Q_{i+1}^{j+1}\right) = \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot Q_{i+1}^{j+1} + \alpha \cdot \left(Q_{i+1}^{j+1}\right)^{b} - C \qquad \text{(V.3.2.12)}$$

Pretende-se determinar o valor do caudal Q_{i+1}^{j+1} que anule a função $f\left(Q_{i+1}^{j+1}\right)$. Como a função é não linear, pode-se resolver pelo método de *Newton - Raphson*.

O método de *Newton - Raphson*, aplicado ao caso presente baseia-se na seguinte expressão:

$$\left(Q_{i+1}^{j+1}\right)_{k+1} = \left(Q_{i+1}^{j+1}\right)_{k} - \frac{f\left(Q_{i+1}^{j+1}\right)_{k}}{\left[\frac{\partial f\left(Q_{i+1}^{j+1}\right)}{\partial Q_{i+1}^{j+1}}\right]} \qquad \text{(V.3.2.13)}$$

A derivada da função *f* em ordem a Q_{i+1}^{j+1} é dada por:

$$\frac{\partial f\left(Q_{i+1}^{j+1}\right)}{\partial Q_{i+1}^{j+1}} = \frac{\Delta t}{\Delta x} + \alpha \cdot \beta \cdot \left(Q_{i+1}^{j+1}\right)^{b-1} \qquad \text{(V.3.2.14)}$$

O cálculo de Q_{i+1}^{j+1} repete-se até que:

$$\frac{\left|\left(Q_{i+1}^{j+1}\right)_{k+1} - \left(Q_{i+1}^{j+1}\right)_{k}\right|}{\left(Q_{i+1}^{j+1}\right)_{k+1}} \le \varepsilon \qquad \text{(V.3.2.15)}$$

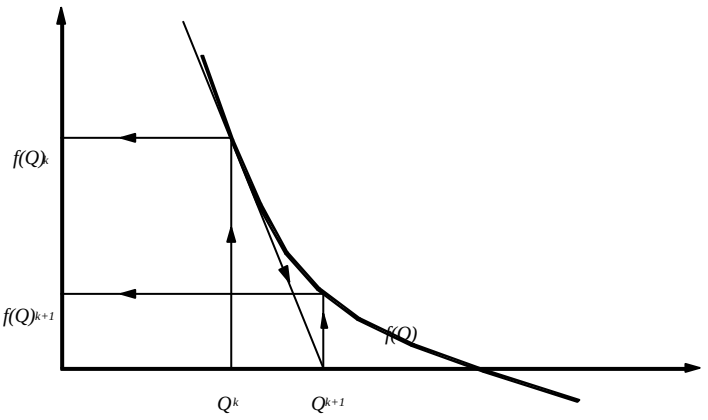


Figura V.3.2.1 - Esquema de uma iteração do método de Newton - Raphson

V.4 - Condição de estabilidade de Courant

A condição necessária de estabilidade, que limita o passo de cálculo dos métodos explícitos, é dada pela condição de Courant, (Courant et al., 1928, em Silva, 1996).

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{c_k}$$

em que:

Δt incrementos de tempo;

Δx incrementos de espaço na direcção do escoamento;

c_k celeridade da onda cinemática.

A celeridade da onda cinemática, como já se viu anteriormente é dada por:

$$c_k = \frac{1}{B} \cdot \frac{dQ}{dy} = \frac{dx}{dt} = \frac{dQ}{dA} = \frac{1}{\alpha \cdot \beta \cdot Q^{\beta - 1}} \qquad \text{(V.4.1)}$$

como:

$$\alpha = \left(\frac{P^{2/3}}{K_s \cdot S_0^{1/2}} \right) \qquad \text{(V.4.2)}$$

e:

$$\beta = \frac{3}{5} \qquad \text{(V.4.3)}$$

vem:

$$\Delta t \leq \Delta x \cdot \left(\frac{P^{2/3}}{K_s \cdot S_0^{1/2}} \right) \cdot \frac{3}{5} \cdot Q^{\frac{3}{5}-1} \qquad \text{(V.4.4)}$$

De acordo com a fórmula de Manning-Strickler, o caudal é dado por:

$$Q = A \cdot K_s \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot S_0^{\frac{1}{2}} \qquad \text{(V.4.5)}$$

substituindo, vem:

$$\Delta t \leq \Delta x \cdot \frac{3}{5} \cdot \left(\frac{P^{2/3}}{K_s \cdot S_0^{1/2}} \right) \cdot \left(A \cdot K_s \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot S_0^{\frac{1}{2}} \right)^{-0.4} \qquad \text{(V.4.6)}$$

simplificando, obtém-se:

$$\Delta t \leq \Delta x \cdot \frac{3}{5} \cdot \left(\frac{P^{2/3}}{K_s \cdot S_0^{1/2}} \right) \cdot \left(A \cdot K_s \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot S_0^{\frac{1}{2}} \right)^{-0.4} \qquad \text{(V.4.7)}$$

Como no modelo desenvolvido, os incrementos de tempo são constantes, esta condição é verificada para todos os troços de rede hidrográfica em todos os instantes e adopta-se o menor dos incrementos de tempo.

Na prática constata-se esta condição é muito conservadora, podendo-se utilizar incrementos de tempo superiores sem que surjam erros significativos, mesmo com o método linear.

VI - Modelo 'QUASI 2D'

As equações apresentadas nos capítulos IV e V foram deduzidas para a situação de escoamento segundo uma única direcção. Numa bacia hidrográfica o escoamento ocorre sobre a superfície do terreno e toma a direcção do maior declive.

Assim tomando por exemplo o modelo digital do relevo apresentado na figura VI.1.

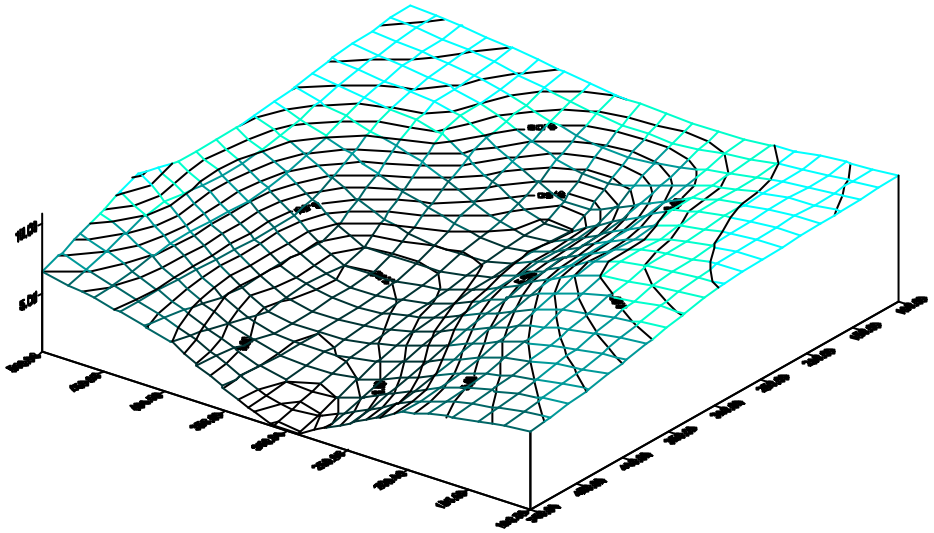


Figura VI.1 - Modelo digital do terreno

A bacia pode ser dividida em células segundo uma quadrícula de malha regular. Cujas propriedades como os parâmetros que caracterizam o solo e a precipitação são homogéneas no interior de cada célula, podendo no entanto variar de célula para célula.

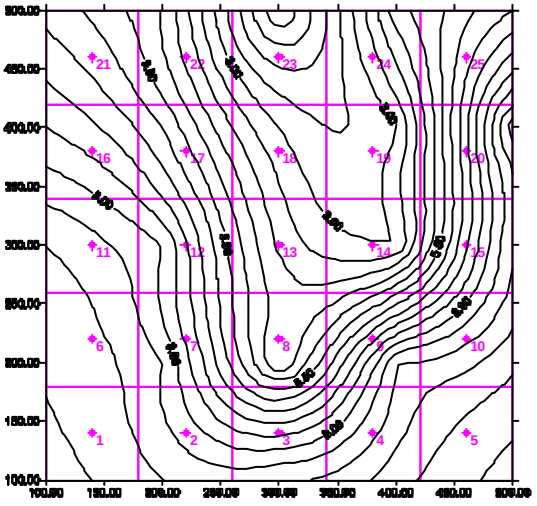


Figura VI.2 - Discretização da bacia hidrográfica em células

Conhecendo as cotas do centro de gravidade de cada célula, modelo digital do relevo, é possível gerar o mapa de declives. Assim, para ocorrer a saída de um determinado volume de água de uma célula qualquer, e admitindo células de forma quadrada, existem oito direcções possíveis, tal como indicado na figura VI.3.

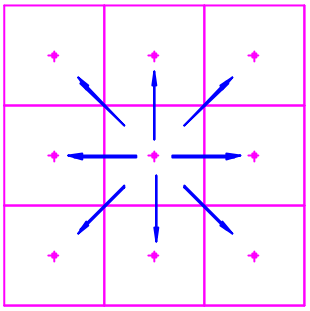


Figura VI.3 - Possíveis direcções do escoamento

A direcção escolhida é aquela segundo a qual o declive é mais acentuado. A representação dos caminhos tomados pelo escoamento, segundo os quais se dá a entrada e saída de água e sedimentos para cada célula, é a rede hidrográfica.

Com base na topografia do exemplo da figura VI.1, representa-se na figura VI.4, a rede hidrográfica definida pelo critério acima referido.

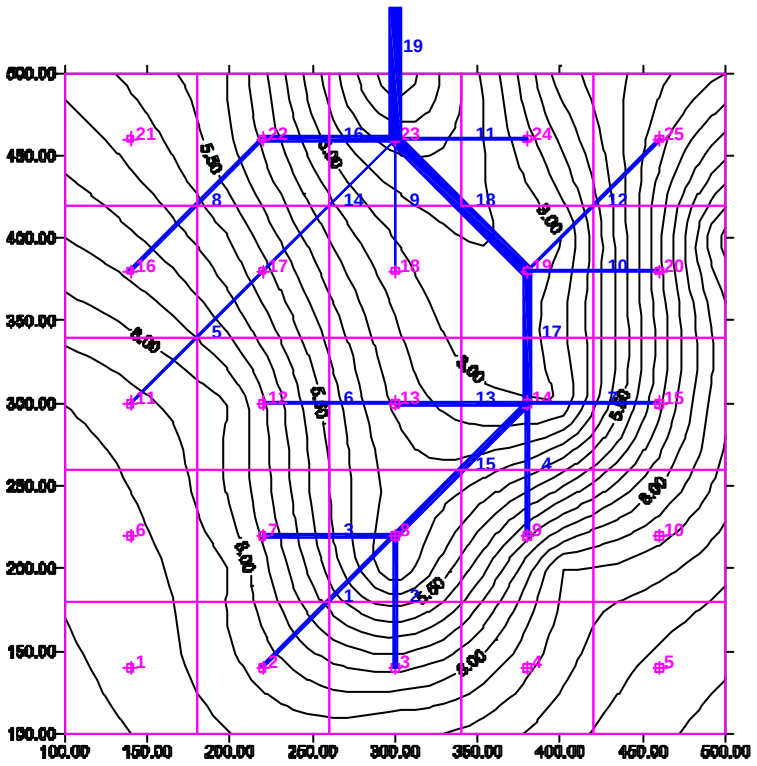


Figura VI.4 - Discretização da rede hidrográfica

Deste modo os centros de gravidade das células podem-se considerar nós e a rede é definida por um conjunto de troços. Cada troço tem como atributos o nó de montante, o nó de jusante, declive, largura da base, declive da margem direita, declive da margem esquerda, rugosidade e ordem.

O nó de montante representa o número da célula que fornece caudal ao troço e o nó de jusante representa o número da célula à qual o troço fornece caudal. O número de ordem representa o número de troços que existem a montante até à nascente.

O procedimento para gerar a rede hidrográfica a partir de uma matriz contendo *ny* linhas por *nx* colunas, contendo as cotas dos centros de gravidade das células, designada por DEM, do Inglês "*Domain Elevation Model*", é esquematizado no fluxograma da figura VI.5.

A sub-rotina **GeraRedeHidrográfica()** tem como resultado três vectores de dimensão *Nc*, igual ao número de troços em que a rede hidrográfica foi discretizada. Os vectores são:

no1(Nc)	contém o número da célula a montante do troço de rede hidrográfica;
no2(Nc)	contém o número da célula a jusante do troço de rede hidrográfica;
Ordem(Nc)	contém o número de ordem do troço de rede hidrográfica.

A sub-rotina **GeraRedeHidrográfica()** recorre a duas sub-rotinas auxiliares, a sub-rotina **Direc(ix, iy)** em que *ix* e *iy* representam a linha e a coluna respectivamente de uma célula na matriz DEM, os valores de *ix* e *iy* são alterados, passando a representar a linha e a coluna da célula adjacente, cuja direcção faz o maior declive com a célula anterior.

A sub-rotina **OrdenaRede()** ordena os troços de rede hidrográfica nos vectores por ordem ascendente do seu número de ordem. Isto é necessário visto a ordem de cálculo ser obrigatoriamente esta. Por forma a que quando se inicia o cálculo do escoamento num troço de ordem *c*, já todos os de ordem *1, 2, …c-1* já terem sido calculados nesse instante.

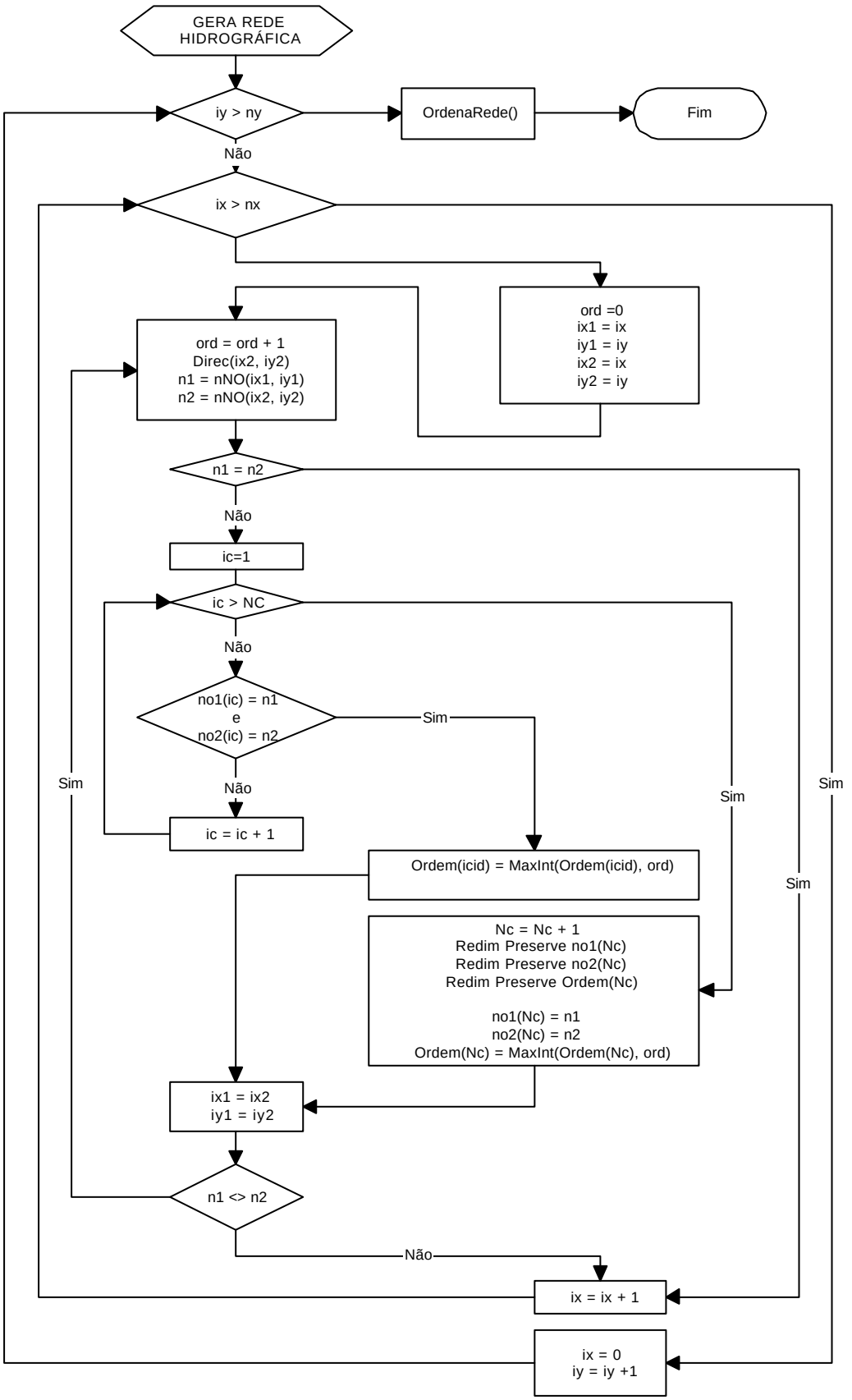


Figura VI.5 - Fluxograma da sub-rotina GeraRedeHidrográfica

O declive S_0 de um troço *ic* é definido como:

$$(S_0)_{ic} = \frac{Cota(N_2)_{ic} - Cota(N_1)_{ic}}{L_{ic}} \qquad \text{(VI.1)}$$

As variáveis $(m_1)_{ic}$ *e* $(m_2)_{ic}$ representam a tangente do ângulo formado entre a vertical e a margem esquerda e direita do troço *ic* respectivamente .

A secção transversal supõe-se ter forma trapezoidal assimétrica, como representado na figura VI.7.

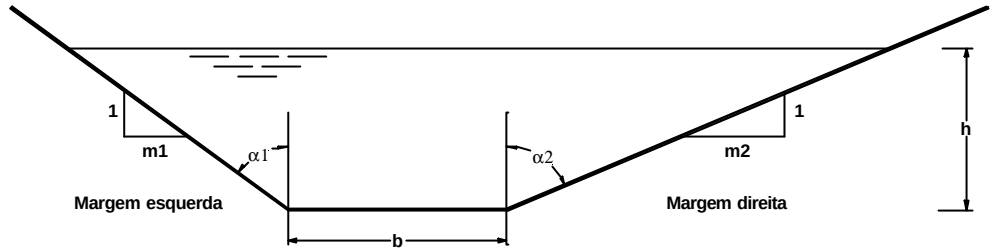


Figura VI.7 - Secção transversal

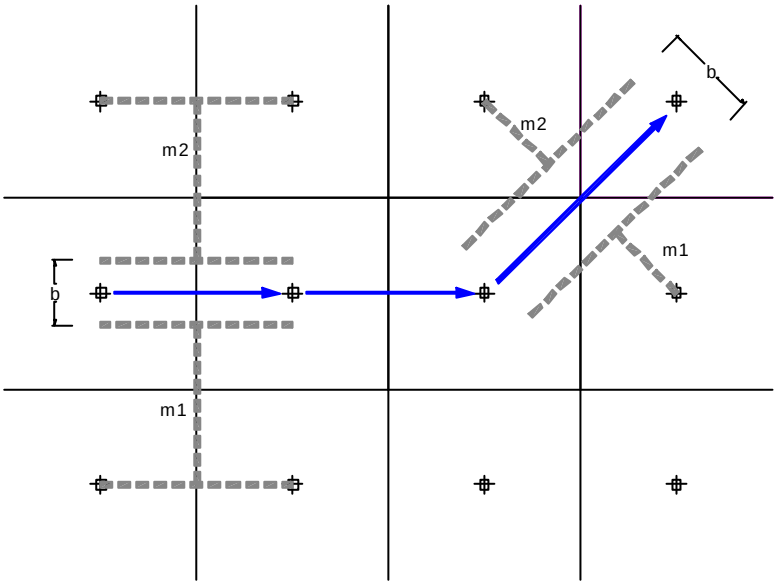


Figura VI.8 - Definição da secção transversal

Para a definição da secção transversal, considere-se o esquema representado em planta na figura VI.8.

sendo:

$$b_{ic} = \frac{Ordem(ic)}{Ordem(nc)} \cdot b_{nc} \qquad \text{(VI.2)}$$

em que:

b_{nc}	largura do rasto do último troço, medida no local;
b_{ic}	largura do rasto do troço corrente;
Ordem(ic)	número de ordem do troço corrente;
Ordem(nc)	número de ordem do último troço.

O número de ordem de um troço é o maior número de troços que lhe estão a montante mais um.

Desta forma define-se a largura do rasto de todos os troços, como função da sua ordem. Ou seja os troços com números de ordem inferiores, mais próximos das cabeceiras terão largura de rasto pequena. Os troços com números de ordem superiores, pertencentes ao canal principal terão largura de rasto maior.

Os declives das margens esquerda e direita, m_1 e m_2, são definidos com base no esquema apresentado na figura VI.7 como:

$$m_{1_{ic}} = \tan(\alpha_1)_{ic} \qquad \text{(VI.3)}$$

$$m_{2_{ic}} = \tan(\alpha_2)_{ic} \qquad \text{(VI.4)}$$

Sempre que pela localização do troço junto ao limite da bacia hidrográfica a cota de uma célula adjacente necessária para a definição de m não esteja definida é assumida a simetria da secção transversal ou seja $m_1 = m_2$ ou $m_2 = m_1$ consoante aquele que seja possível determinar.

Sempre que $m_1 \leq 0$, ou $m_2 \leq 0$ a secção transversal do troço é considerada rectangular.

A estrutura de dados da rede hidrográfica representada na figura VI.4 é a apresentada no quadro VI.1.

TROÇO ID	NÓ1	NÓ2	ORDEM	L (m)	S0 m/m	B m	M1 (m/m)	M2 (m/m)
1	2	8	1	141.42	0.035	1.80	-1	-1
2	3	8	1	100.00	0.050	1.80	-1	-1
3	7	8	1	100.00	0.045	1.80	36.036	36.036
4	9	14	1	100.00	0.060	1.80	-1	-1
5	11	17	1	141.42	0.021	1.80	-1	-1
6	12	13	1	100.00	0.041	1.80	330.333	330.333
7	15	14	1	100.00	0.060	1.80	-1	-1
8	16	22	1	141.42	0.018	1.80	-1	-1
9	18	23	1	100.00	0.017	1.80	58.294	29.582
10	20	19	1	100.00	0.069	1.80	-1	-1
11	24	23	1	100.00	0.035	1.80	-1	-1
12	25	19	1	141.42	0.026	1.80	-1	-1
13	13	14	2	100.00	0.009	3.60	32.197	32.197
14	17	23	2	141.42	0.033	3.60	51.045	51.045
15	8	14	2	141.42	0.007	3.60	12.529	172.277
16	22	23	2	100.00	0.037	3.60	72.741	72.741
17	14	19	3	100.00	0.001	5.40	15.085	194.600
18	19	23	4	141.42	0.011	7.20	24.856	74.567
19	23	28	5	100.00	0.008	9.00	-1	-1

Quadro VI.1 - Dados da rede hidrográfica discretizada

Na situação em que não é possível definir as variáveis m_1 e m_2 esta assume o código (*-1*) e para efeitos de cálculo o troço de canal é considerado como tendo geometria rectangular. Isto só se verifica em alguns troços de cabeceira. Nos troços de ordens superiores em que o efeito da geometria do canal tem maior influência no comportamento do escoamento a sua geometria é sempre possível definir a secção trapezoidal assimétrica.

VI.1 - Factor de sinuosidade adicional

Ao traçar a rede hidrográfica com base num modelo digital do terreno, a rede obtida é uma aproximação da rede real. A diferença entre a rede de cálculo e a rede real aumenta com o aumento da dimensão da célula utilizada no modelo digital do relevo.

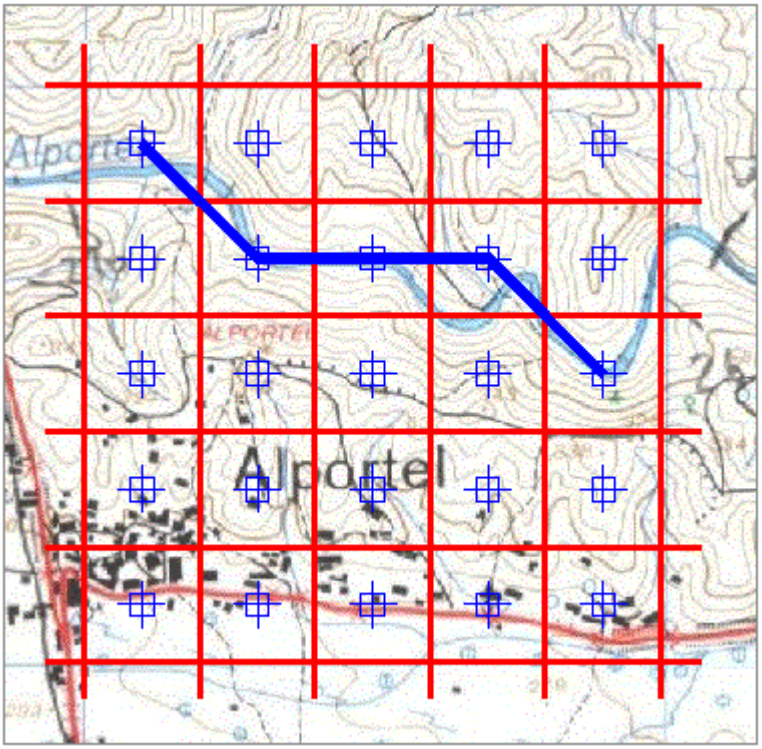


Figura VI.1.1 - Factor de sinuosidade adicional

O comprimento total das linhas de água na rede hidrográfica real á superior ao comprimento total das linhas de água na rede hidrográfica de cálculo, como pode ser observado na figura VI.1.1.

Desta forma pode-se definir um factor de correcção que será calculado por:

$$F_{SA} = \frac{E_{real}}{E_{calculo}} \qquad \text{(VI.1.1)}$$

sendo:

F_{SA} factor de sinuosidade adicional;

E_{real} comprimento da linha de água principal, medido sobre a cartografia de base;

$E_{calculo}$ comprimento da linha de água principal, obtido pelo somatório dos comprimentos dos troços que definem essa mesma linha.

No cálculo, o comprimento de todos os troços é multiplicado por este factor.

VI.2 - Coeficiente de rugosidade de Manning-Strickler (Ks)

A perda de carga que se verifica no escoamento devida ao atrito entre a água e o leito das linhas de água varia com o material e forma do leito e vegetação que se encontra neste.

No capítulo V, na dedução da equação da Onda Cinemática, empregou-se a equação de Manning-Strickler.

Numa bacia hidrográfica, verifica-se que a rugosidade do leito dos troços de linha de água varia com a ordem desse mesmo troço. Os troços de cabeceira apresentam o leito mais irregular e com mais vegetação do que os troços de ordens superiores pertencentes às linhas de água principais.

Com base nessa constatação adoptou-se por definir o coeficiente de rugosidade para os troços de cabeceira e para a secção de controlo onde se encontra a estação hidrométrica. Para os restantes troços, considera-se a variação do coeficiente de rugosidade directamente proporcional ao número de ordem do respectivo troço, sendo o coeficiente de rugosidade de um troço *i* dado por:

$$Ks_{ic} = Ks_{cab} + \left(Ordem\left(ic\right) - 1\right) \cdot \frac{Ks_{foz} - Ks_{cab}}{Ordem\left(nc\right)} \qquad \text{(VI.2.1)}$$

sendo:

ic	troço corrente;
Ks_{ic}	coeficiente de rugosidade de Manning-Strickler do troço *ic*;
Ks_{cab}	coeficiente de rugosidade de Manning-Strickler dos troços de cabeceira (ordem 1);
Ks_{foz}	coeficiente de rugosidade de Manning-Strickler do troço final da linha de água principal;
nc	número do último troço da rede que representa o troço onde se encontra a estação hidrométrica.

Os coeficientes de rugosidade na cabeceira e na secção de controlo foram atribuídos de acordo com Chow, 1973.

VI.3 - Aplicação do modelo de onda cinemática na rede hidrográfica

A formulação do modelo de onda cinemática apresentada no capítulo V refere-se á situação de escoamento unidimensional.

No caso de o escoamento se efectuar numa rede, a grelha numérica apresentada na figura V.3.1 terá que ser transformada numa estrutura semelhante à apresentada na figura VI.3.1, onde na vertical se representa a variável tempo.

Desta forma cada troço terá também dois vectores como atributos, um representando os caudais no nó de montante e outro representando os caudais no nó de jusante. Cada um destes vectores contém tantos elementos quantos os intervalos de tempo considerados no cálculo.

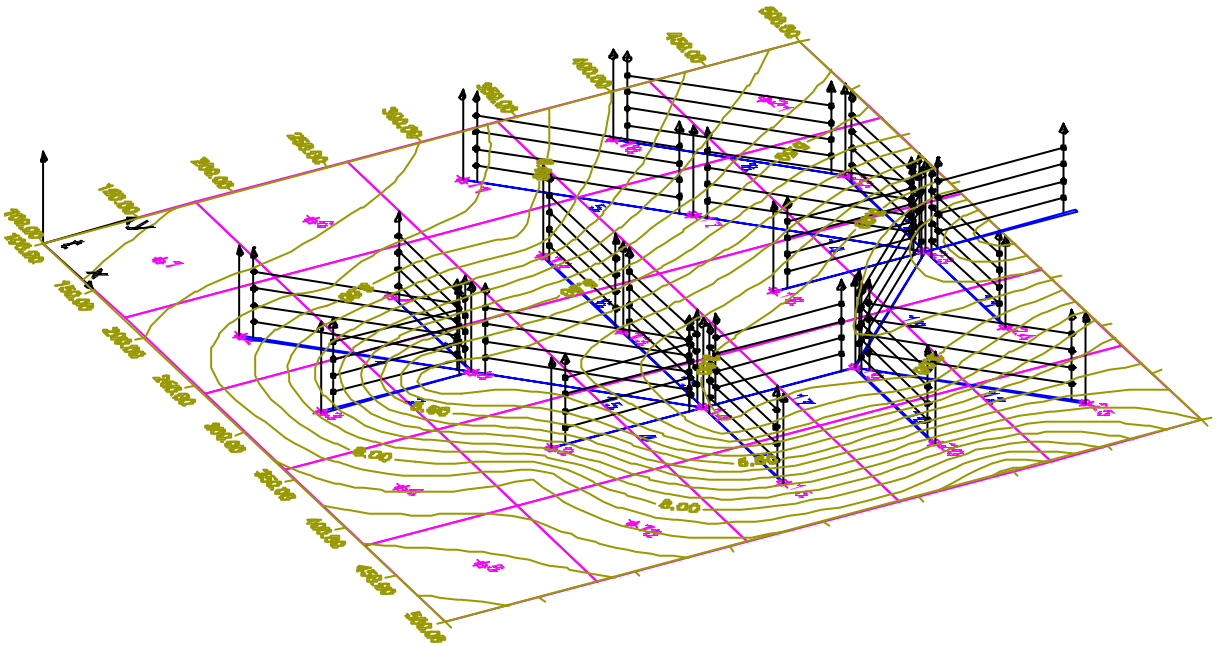


Figura VI.3.1 - Representação esquemática da estrutura de dados

A informação espacialmente distribuída, como a cota, classe taxonómica do solo, a classe de uso do solo e a classe de infiltração, resultante da intersecção destas últimas duas, são níveis de informação de uma matriz que representa as propriedade estáticas da bacia, ou seja propriedades que para o intervalo de tempo de cálculo são invariáveis. A precipitação após ser espacialmente distribuída, é armazenada numa matriz com tantas linhas quanto o número de células e tantas colunas quanto o número de intervalos de tempo considerados.

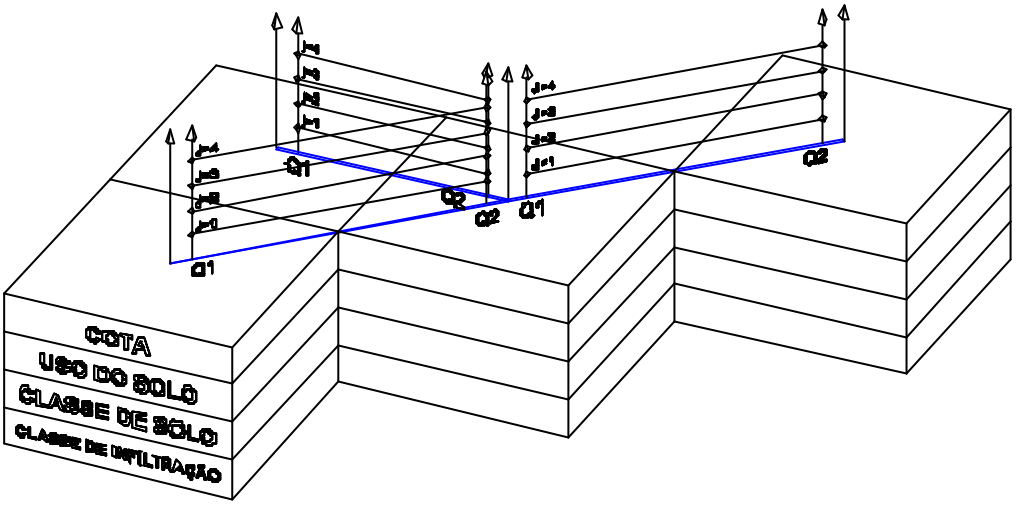


Figura VI.3.2 - Representação esquemática da estrutura dos dados (pormenor)

VI.3.1 - Método linear

Assim a expressão apresentada no capítulo V, adaptada à rede tem a seguinte forma:

$$\left(Q_2^{j+1}\right)_{ic} = \frac{\frac{\left(q_{No(1)}^{j+1}\right)_{ic} + \left(q_{No(1)}^{j}\right)_{ic}}{2} \cdot \Delta t + a \cdot b \cdot \left[\frac{\left(Q_1^{j+1}\right)_{ic} + \left(Q_2^{j}\right)_{ic}}{2}\right] \cdot \left(Q_2^{j}\right)_{ic} + \left(Q_1^{j+1}\right)_{ic} + \left(Q_1^{j+1}\right)_{ic} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x}}{\frac{\Delta t}{\Delta x} + a \cdot b \cdot \left[\frac{\left(Q_1^{j+1}\right)_{ic} + \left(Q_2^{j}\right)_{ic}}{2}\right]^{b-1}}$$

(VI.3.1.1)

sendo:

j	nível de tempo;
ic	número do troço;
$(Q_1)_{ic}$	caudal a montante do troço ic;
$(Q_2)_{ic}$	caudal a jusante do troço ic;
Dt	intervalo de tempo;
Dx	comprimento do troço;
a e b	têm o mesmo significado que no capítulo V;
$q_{No(1)}^{j}$	caudal de percurso calculado com base no excesso de precipitação gerado na célula a montante do respectivo troço.

VI.3.2. Método não linear

O método não linear de resolução da equação da onda cinemática apresentado no capítulo V, adaptado à rede, resulta no seguinte:

$$C = \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot \left(Q_1^{j+1}\right)_{ic} + \alpha \cdot \left(\left(Q_2^{j}\right)_{ic}\right)^{b} + \Delta t \cdot \left(\frac{\left(q_{No\,(1)}^{j+1}\right)_{ic} + \left(q_{No\,(1)}^{j}\right)_{ic}}{2} \right) \qquad \text{(VI.3.2.1)}$$

e:

$$f\left(\left(Q_2^{j+1}\right)_{ic}\right) = \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot \left(Q_2^{j+1}\right)_{ic} + \alpha \cdot \left(\left(Q_2^{j+1}\right)_{ic}\right)^{b} - C \qquad \text{(VI.3.2.2)}$$

O valor do caudal na secção dois no troço *ic* $\left(Q_2^{j+1}\right)_{ic}$ será o zero da função $f\left(\left(Q_2^{j+1}\right)_{ic}\right)$. Como a função é não linear, emprega-se um método de resolução numérica de equações como o método de *Newton - Raphson*.

VI.4 - Cálculo da altura do escoamento

Conhecendo a geometria de todos os troços e respectivos caudais é possível determinar a altura do escoamento. No modelo de onda cinemática, isto pode ser efectuado pelo cálculo da altura uniforme. Já que este modelo assume que numa determinada secção ocorrem estágios de regime uniforme que se alteram de instante para instante, ver capítulo V.

VI.4.1 - Secção trapezoidal assimétrica

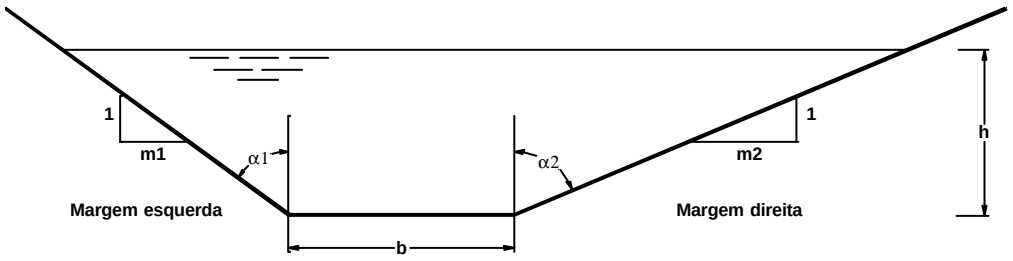


Figura VI.4.1 - Secção trapezoidal assimétrica

Sendo conhecida a largura do rasto *b* e as co-tangentes das margens m_1 e m_2 a largura superficial *B* será dada por:

$$B = b + h \cdot m_1 + h \cdot m_2 \quad \text{(VI.4.1.1)}$$

$$B = b + h \cdot (m_1 + m_2) \quad \text{(VI.4.1.2)}$$

A área da secção transversal é:

$$A = \frac{B + b}{2} \cdot h \quad \text{(VI.4.1.3)}$$

$$A = \frac{b + b + h \cdot (m_1 + m_2)}{2} \cdot h \quad \text{(VI.4.1.4)}$$

$$A = \frac{1}{2} \cdot h \cdot [2 \cdot b + h \cdot (m_1 + m_2)] \quad \text{(VI.4.1.5)}$$

O perímetro molhado é calculado com base em:

$$P = b + \sqrt{h^2 + (h \cdot m_1)^2} + \sqrt{h^2 + (h \cdot m_2)^2} \quad \text{(VI.4.1.6)}$$

$$P = b + h \cdot \left(\sqrt{1 + m_1^2} + \sqrt{1 + m_2^2}\right) \quad \text{(VI.4.1.7)}$$

O raio hidráulico é dado pela área sobre o perímetro, ou seja:

$$R = \frac{A}{P} = \frac{1}{2} \cdot \frac{h \cdot [2 \cdot b + h \cdot (m_1 + m_2)]}{b + h \cdot \left(\sqrt{1 + m_1^2} + \sqrt{1 + m_2^2}\right)} \quad \text{(VI.4.1.8)}$$

Utilizando como lei de resistência do escoamento a fórmula de Manning-Strickler:

$$Q = A \cdot K_s \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot S_0^{\frac{1}{2}} \quad \text{(VI.4.1.9)}$$

sendo:

- A área da secção transversal do escoamento;
- K_s coeficiente de rugosidade;
- R raio hidráulico;
- S_0 declive do perfil longitudinal.

Substituindo as expressões VI.4.1.5, VI.4.1.7 e VI.4.1.8 para o cálculo da área, perímetro e raio hidráulico na lei de resistência do escoamento, equação VI.4.1.9, obtém-se:

$$Q = A \cdot k \cdot \left(\frac{A}{P}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot S_0^{\frac{1}{2}} \quad \text{(VI.4.1.10)}$$

$$Q = \frac{k \cdot A^{\frac{5}{3}} \cdot S_0}{P^{\frac{2}{3}}} \qquad \text{(VI.4.1.11)}$$

$$\frac{k \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot h \cdot \left(2 \cdot b + h \cdot \left(m_1 + m_2\right)\right)\right]^{\frac{5}{3}} \cdot S_0^{\frac{1}{2}}}{\left[b + h \cdot \left(\sqrt{1+m_1^2} + \sqrt{1+m_2^2}\right)\right]^{\frac{2}{3}}} - Q = 0 \qquad \text{(VI.4.1.12)}$$

A equação VI.4.1.12 é uma equação não linear cuja variável independente é *h*. A equação é convergente pelo método das substituições sucessivas.

VI.4.2 - Secção rectangular

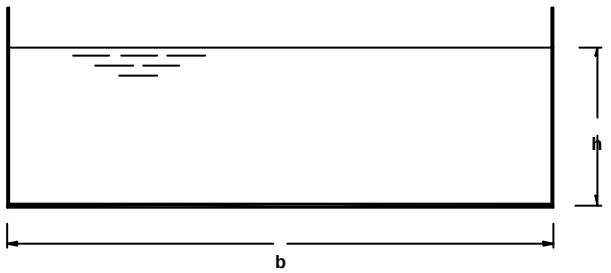


Figura VI.4.2.1 - Secção rectangular

Sendo conhecida a largura do rasto *b* a largura superficial *B* será dada por:

$$B = b \qquad \text{(VI.4.2.1)}$$

A área da secção transversal é:

$$A = b \cdot h \qquad \text{(VI.4.2.2)}$$

O perímetro molhado é calculado com base em:

$$P = b + 2 \cdot h \qquad \text{(VI.4.2.3)}$$

O raio hidráulico é dado pela área sobre o perímetro, ou seja:

$$R = \frac{A}{P} = \frac{b \cdot h}{b + 2 \cdot h} \qquad \text{(VI.4.2.4)}$$

Utilizando como lei de resistência do escoamento a fórmula de Manning-Strickler:

$$Q = A \cdot k \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot S_0^{\frac{1}{2}} \qquad \text{(VI.4.2.5)}$$

sendo:

A área da secção transversal do escoamento;

k coeficiente de rugosidade;

R raio hidráulico;

S_0 declive do perfil longitudinal.

Substituindo as expressões VI.4.2.2, VI.4.2.3 e VI.4.2.4 para o cálculo da área, perímetro e raio hidráulico lei de resistência do escoamento, obtém-se:

$$Q = A \cdot k \cdot \left(\frac{A}{P} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot S_0^{\frac{1}{2}} \qquad \text{(VI.4.2.6)}$$

$$Q = \frac{k \cdot A^{\frac{5}{3}} \cdot S_0}{P^{\frac{2}{3}}} \qquad \text{(VI.4.2.7)}$$

$$\frac{k \cdot (b \cdot h)^{\frac{5}{3}} \cdot S_0^{\frac{1}{2}}}{(b + 2 \cdot h)^{\frac{2}{3}}} - Q = 0 \qquad \text{(VI.4.2.8)}$$

A equação VI.4.2.8 é uma equação não linear cuja variável independente é h. A equação é convergente pelo método iterativo das substituições sucessivas.

VI.5 - Cálculo das isócronas

As isócronas são linhas de igual tempo de propagação do escoamento até à secção de referência, ou seja a área compreendida entre a secção de controlo e a isócrona correspondente a um instante delimita a área de contribuição correspondente a esse instante. A essa área de contribuição pertencem as células cujo excesso de precipitação atinge a secção de controlo num tempo igual ou inferior ao do instante correspondente à isócrona em questão.

O cálculo do tempo que o caudal oriundo de uma célula leva até à secção de controlo é feito com base no conhecimento da celeridade da onda cinemática.

VI.5.1 - Cálculo da celeridade da onda cinemática

Como foi demonstrado no capítulo V, a celeridade da onda cinemática num determinado troço, e num determinado instante é dada por:

$$\left(c_k\right)_{ic}^{j} = \frac{1}{\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b}\cdot\left(Q_{ic}^{j}\right)^{b-1}} \qquad \text{(VI.5.1.1)}$$

sendo:

$$\boldsymbol{a} = \left(\frac{\left(P_{ic}^{j}\right)^{\frac{2}{3}}}{\left(k_s\right)_{ic}\cdot\left(S_{0\,ic}\right)^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{3}{5}} \qquad \text{(VI.5.1.2)}$$

e:

$$\boldsymbol{b} = \frac{3}{5} \qquad \text{(VI.5.1.3)}$$

em que as variáveis assumem o seguinte significado:

- j nível de tempo;
- ic número do troço.
- K_s coeficiente de rugosidade de Manning-Strickler;
- S_o declive longitudinal do troço;
- P perímetro molhado.

VI.5.2 - Cálculo do tempo de propagação do escoamento

O tempo de propagação do escoamento de uma célula é o tempo necessário para que o excesso de precipitação dessa célula atinja a secção de controlo.

Admitindo por simplificação o caudal de percurso nulo, a distância percorrida em função do tempo será dada por:

$$x_{ic} = \left(c_k\right)_{ic}^{j}\cdot t_{ic} \qquad \text{(VI.5.2.1)}$$

sendo:

- x_{ic} distância percorrida ao longo do canal ic;
- t_{ic} tempo que a onda leva a percorrer a distância x_{ic}.

Explicitando t_{ic}, obtém-se:

$$t_{ic} = \frac{x_{ic}}{(c_k)_{ic}^{j}} \qquad \text{(VI.5.2.2)}$$

O valor de j inicial corresponde ao nível de tempo da isócrona que se está a calcular e é calculado por:

$$j = \frac{t_{iso}}{\Delta t} \qquad \text{(VI.5.2.3)}$$

sendo :

t_{iso} tempo correspondente à isócrona que se está a determinar;

Δt intervalo de tempo considerado nos métodos numéricos para a resolução da equação da onda cinemática.

Substituindo x_{ic} pelo comprimento total do troço L_{ic} e considerando todos os troços a percorrer até chegar à secção de controlo, o tempo que o excesso de precipitação de uma determinada célula leva a atingir a secção de controlo será dado por:

$$t_{cel} = \sum t_{ic} \qquad \text{(VI.5.2.4)}$$

$$t_{cel} = \sum_{ic} \frac{L_{ic}}{(c_k)_{ic}^{j}} \qquad \text{(VI.5.2.5)}$$

sendo:

L_{ic} o comprimento real do troço *ic*;

t_{cel} tempo de concentração da célula *cel*.

O cálculo de t é repetido para todas as células. Conforme o valor de t, assim se determina entre que isócronas está compreendida a respectiva célula.

VI.6 - Considerações sobre o cálculo

A sequência do cálculo é feita pela ordem crescente do número de ordem dos troços, ou seja primeiro são calculados todos os troços de ordem um, depois todos os troços de ordem dois e assim sucessivamente até ao número de ordem mais elevado na bacia hidrográfica.

O caudal no nó um de cada troço é igual à soma dos caudais nos nós dois do ou dos troços a montante que nele convergem.

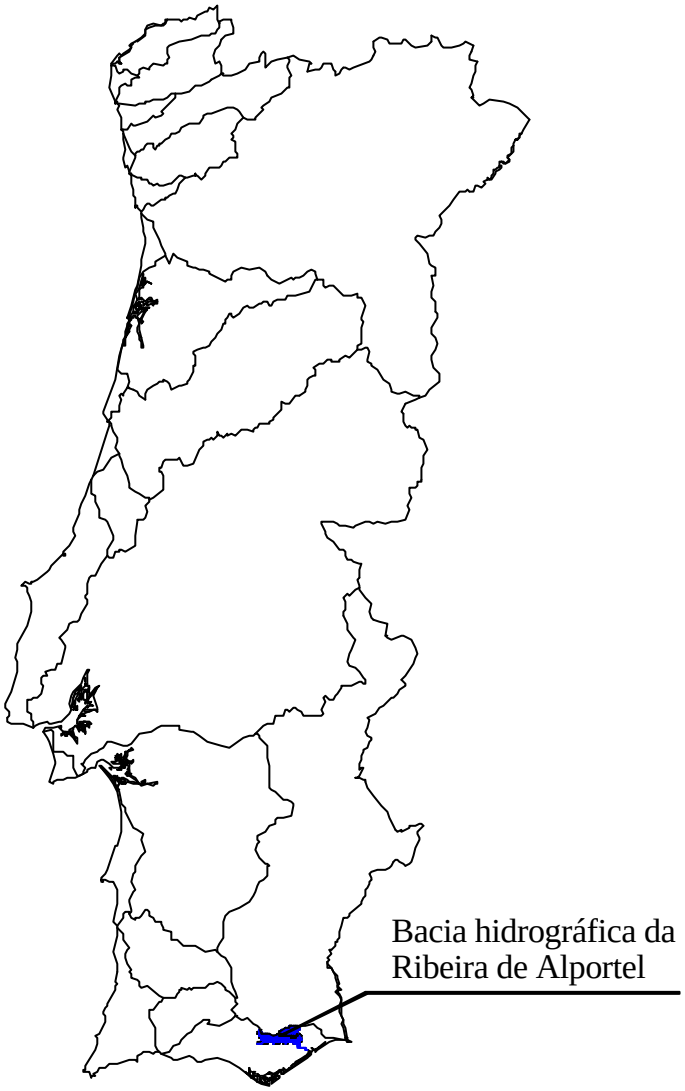
Os caudais são calculados numa primeira fase pelo método linear, e posteriormente são calculados pelo método não linear. Os resultados obtidos na primeira fase servem de estimativa inicial para a primeira iteração do método não linear.

VII - Caracterização da bacia hidrográfica da Ribeira de Alportel

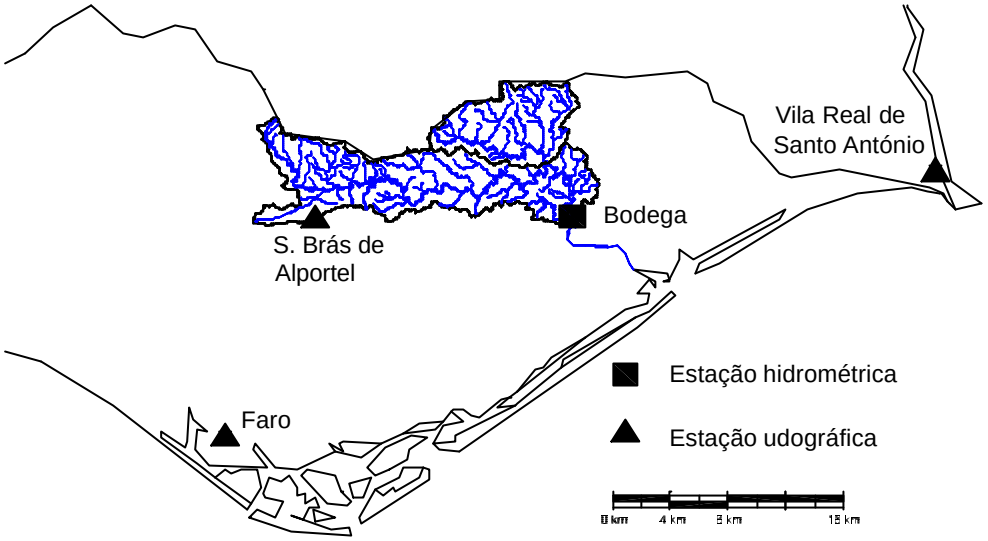
VII.1 - Localização

A bacia hidrográfica da Ribeira de Alportel situa-se no Sotavento Algarvio, a Norte de Tavira.

A Ribeira de Alportel nasce próximo de São Brás de Alportel e desagua no Rio da Séqua. A partir da secção em que se faz sentir a influência das marés este Rio passa a designar-se por Rio Gilão. O Rio Gilão passa pela cidade de Tavira e desagua em Quatro Águas na Ria Formosa.



VII.1.1 - Localização da bacia hidrográfica da Ribeira de Alportel em Portugal Continental



VII.1.2 - Localização da bacia hidrográfica da Ribeira de Alportel no Sotavento Algarvio

VII.2 - Geomorfologia da bacia

A topografia da bacia é representada pelo seu modelo digital do relevo, representado na figura VII.2.1.

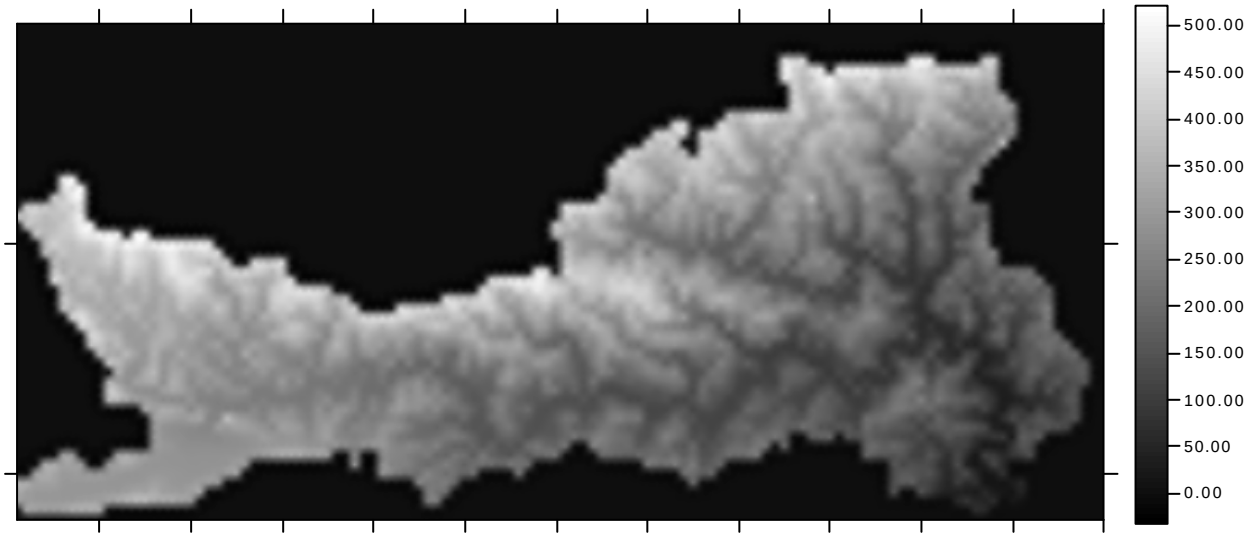


Figura VII.2.1 - Modelo digital do relevo da bacia hidrográfica da Ribeira de Alportel

Os principais parâmetros descritivos da geomorfologia da bacia são apresentados no quadro VII.2.1.

Parâmetro	valor	unidade
Área	132	km^2
Perimetro	86.2	km
Comprimento máximo da bacia	22.5	km
Coeficiente de compacidade	2.11	adim.
Factor de forma	5.88	adim.
Rectangulo equivalente		
L	40	km
l	3.3	km
Densidade de drenagem	4.86	km/km^2
Inclinação média das vertentes	18.3	%
Altitude máxima	520	m
Altitude minima	13	m
Altitude média	245.4	m
Indice de pendente	0.0228	m/m

Quadro VII.2.1 - Parâmetros descritivos da geomorfologia da bacia hidrográfica da Ribeira de Alportel

A curva hipsométrica da bacia hidrográfica da Ribeira de Alportel, calculada com base no modelo digital do relevo é apresentada na figura VII.2.2.

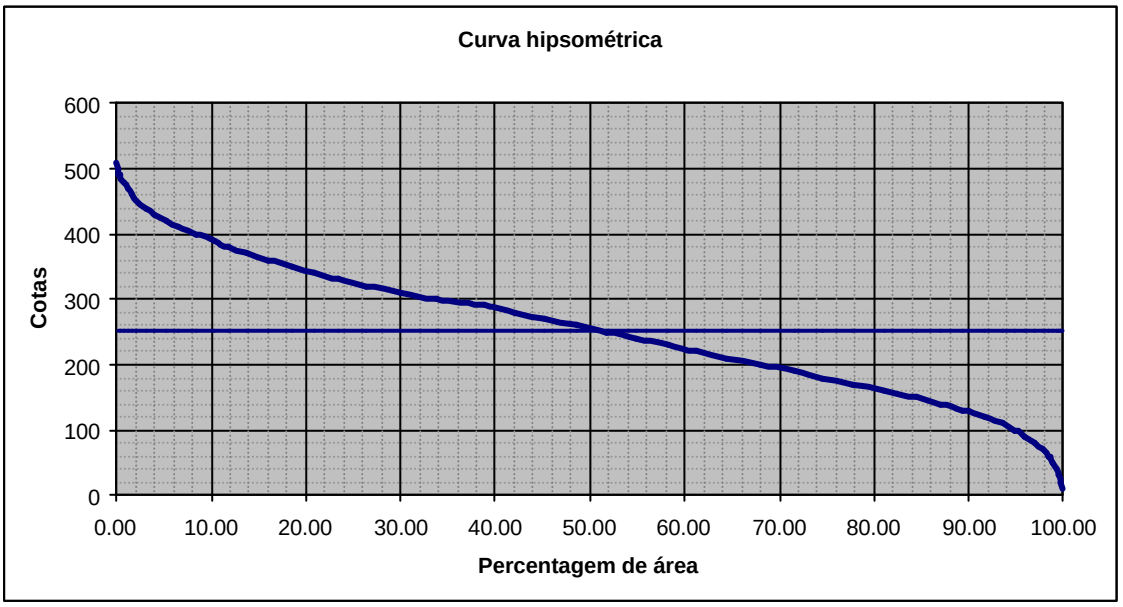


Figura VII.2.2 - Curva hipsométrica da bacia hidrográfica da Ribeira de Alportel

VII.2.15 - Coeficientes de rugosidade de Manning-Strickler

Conforme o exposto no capitulo VI, a rugosidade do leito de um troço é função do número de ordem do respectivo troço e de uma rugosidade máxima para os troços de ordem um, com origem nas cabeceiras a que corresponde um coeficiente de rugosidade K_s mínimo e

de uma rugosidade mínima no troço em que se situa a secção de controlo, em que a ordem é máxima e a que corresponde um coeficiente de rugosidade K_s máximo.

Por observação visual *in-situ*, comparação com as fotos de canais naturais de K_s conhecido apresentadas em Chow, 1959 e alguma aferição dos caudais, utilizaram-se os seguintes valores de K_s:

Nas cabeceiras, $K_s = 4\ m^{1/3} \cdot s^{-1}$

Na secção de controlo, $K_s = 25\ m^{1/3} \cdot s^{-1}$

VII.3 - Rede hidrográfica

A rede hidrográfica obtida por digitalização sobre a carta militar à escala 1:25000 é a seguinte:

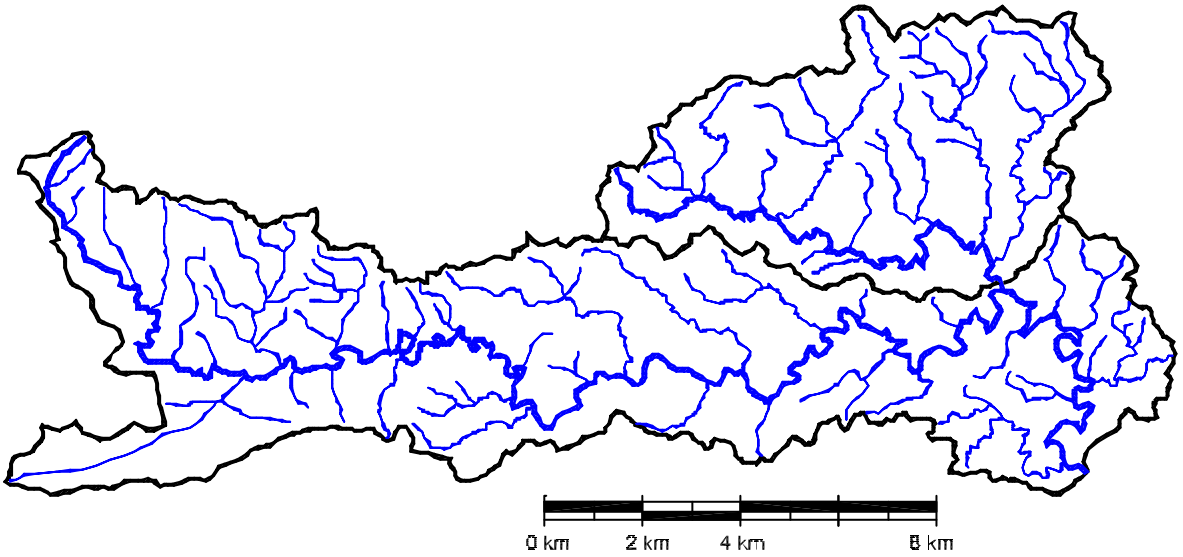


Figura VII.3.1 - Rede hidrográfica da bacia hidrográfica da Ribeira de Alportel

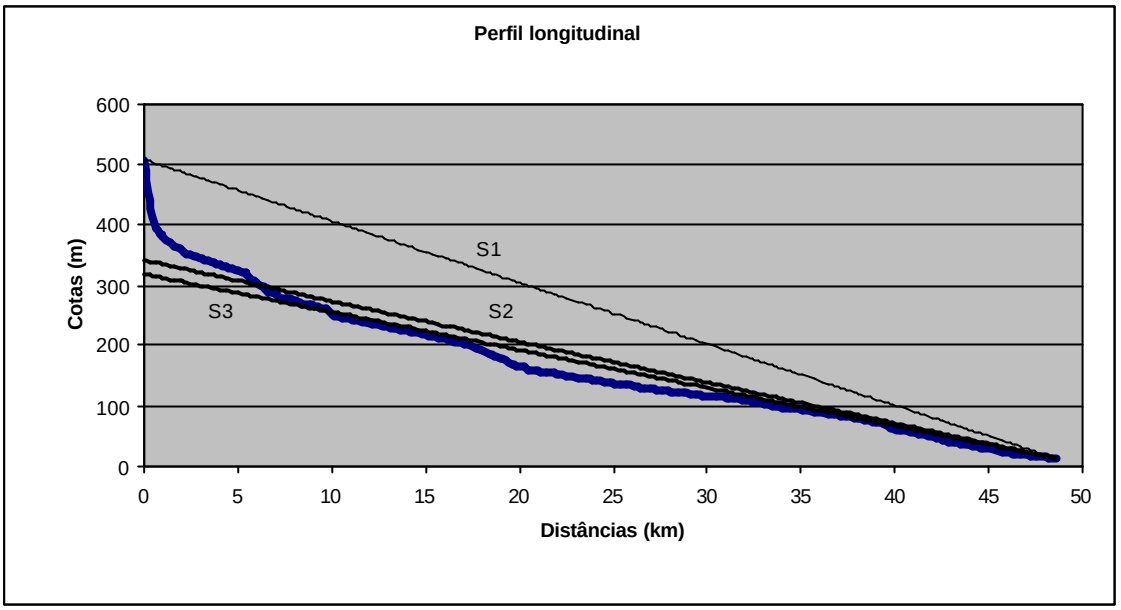


Figura VII.3.2 - Perfil longitudinal da linha de água principal

Parâmetro	valor	unidade
Comprimento da linha de água principal	48.6	km
Sinuosidade	2.26	km/km
Declividade entre a nascente e a foz	0.010189	m/m
Declividade média	0.006748	m/m
Declividade equivalente constante	0.006279	m/m

Quadro VII.3.1 - Parâmetros descritivos da linha de água principal

A geometria da secção de controlo, localizada no sítio da Bodega pode ser observada na fotografia número VII.9.6.

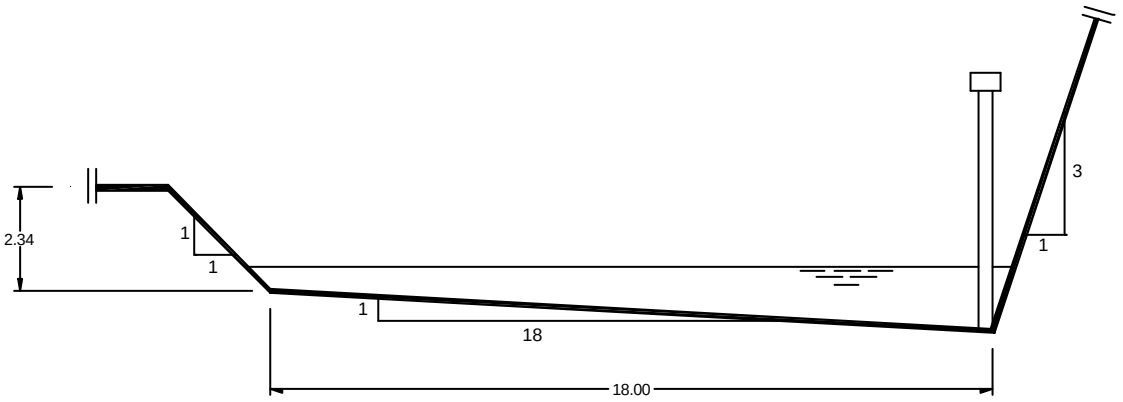


Figura VII.3.3 - Geometria da secção de controlo da estação hidrométrica de Bodega

Estação hidrométrica	Distância à meridiana M	Distância à perpendicular P
Bodega	238 728	21 745

Quadro VII.3.2 - Localização da estação hidrométrica de Bodega

De acordo com a geometria da secção de controlo e com a curva de vazão[1], o caudal máximo que se pode verificar na secção de controlo, por forma a que as margens não sejam inundadas é de:

$$Q = 23.2435 \cdot \left(H - \left(-0.16\right)\right)^{1.7043}$$

para $H = 2.34\ m$, vem:

$$Q = 110.78\ m^3/s$$

VII.4 - Precipitação

Os dados da precipitação provêm de três estações udométricas situadas próximo da bacia hidrográfica da Ribeira de Alportel. As estações são: Faro, São Brás de Alportel e Vila Real de Santo António.

Estação meteorológica	Distância à meridiana M	Distância à perpendicular P
Faro	214 700	6 400
São Brás de Alportel	220 956	21 486
Vila Real de Santo António	263 842	24 724

Quadro VII.4.7.1 - Localização das estações meteorológicas

Os dados da precipitação horária disponíveis no período considerado (distribuídos no tempo) referem-se às respectivas localizações das estações meteorológicas. Para distribuir espacialmente a precipitação na bacia recorreu-se ao método referido no capítulo III.

Com base em (Brandão, 1998) as curvas IDF para períodos de retorno T_r de 50, 100, 500 e 1000 anos para as estações de Faro e São Brás de Alportel são:

$$I_{(mm/hora)} = a \cdot t_{(\min)}^{\ b} \qquad \text{(VII.4.1)}$$

$$P_{(mm)} = c \cdot t_{(horas)}^{\ d} \qquad \text{(VII.4.2)}$$

[1] A curva de vazão apresentada é válida para o período de 95/10/01 a 96/03/11

Estação udográfica	T_r = 50	T_r = 100	T_r = 500	T_r = 1000
S. Brás de Alportel	$I = 570.33 \cdot t^{-0.576}$ $P = 53.94 \cdot t^{0.424}$	$I = 708.99 \cdot t^{-0.577}$ $P = 66.78 \cdot t^{0.423}$	$I = 1174.97 \cdot t^{-0.580}$ $P = 109.32 \cdot t^{0.420}$	$I = 1458.66 \cdot t^{-0.581}$ $P = 135.16 \cdot t^{0.419}$
Faro	$I = 637.12 \cdot t^{-0.638}$ $P = 46.74 \cdot t^{0.362}$	$I = 703.88 \cdot t^{-0.636}$ $P = 52.07 \cdot t^{0.364}$	$I = 858.24 \cdot t^{-0.633}$ $P = 64.27 \cdot t^{0.367}$	$I = 923.71 \cdot t^{-0.631}$ $P = 69.75 \cdot t^{0.369}$

Quadro VII.4.7.2 - Curvas IDF

VII.5 - Pedologia

De acordo com a carta de solos de Portugal, na bacia hidrográfica da Ribeira de Alportel, encontram-se os solos referidos no quadro VII.5.1, cuja distribuição espacial se representa na figura VII.5.1.

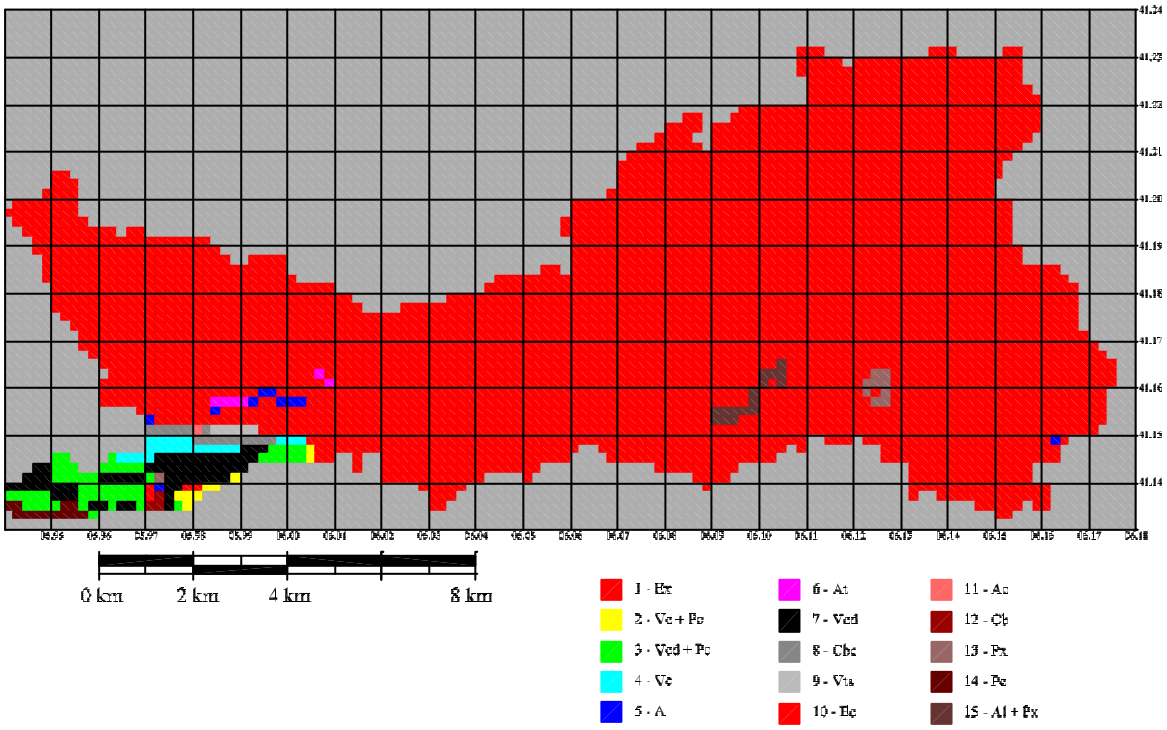


Figura VII.5.1 - Classes taxonómicas do solo da bacia hidrográfica da Ribeira de Alportel

ID	Categorias taxonómicas	
1	Ex	Solos incipientes. Litossolos dos climas sub-húmidos e semiáridos de xistos ou grauvaques;
2	Vc+Pc	Vc - Solos calcários vermelhos dos climas sub-húmidos e semiáridos normais de calcários; Pc - Solos calcários pardos dos climas sub-húmidos e semi-áridos normais de calcários não compactados;
3	Vcd+Pc	Vcd - Solos argiluviados pouco insaturados. Solos mediterrâneos vermelhos ou amarelos normais de calcários compactados ou dolomias; Pc - Solos calcários pardos dos climas sub-húmidos e semi-áridos normais de calcários não compactados;
4	Vc	Solos calcários vermelhos dos climas sub-húmidos e semiáridos normais de calcários;
5	A	Aluviossolos modernos não calcários de textura mediana;
6	At	Aluviossolos antigos de textura mediana;
7	Vcd	Solos argiluviados pouco insaturados. Solos mediterrâneos vermelhos ou amarelos normais de calcários compactados ou dolomias;
8	Cbc	Barro castanho avermelhado calcário não descarbonatado de basaltos ou doleritos;
9	Vts	Solos litólicos não húmicos dos climas sub-húmidos e semiáridos normais de grés de Silves ou rochas afins;
10	Ec	Solos incipientes. Litossolos dos climas sub-húmidos e semiáridos de calcários compactos ou dolomias;
11	Ac	Aluviossolos modernos de textura mediana;
12	Cb	Barros castanho-avermelhados não calcários de basaltos ou doleritos ou outras rochas eruptivas básicas;
13	Px	Solos argiluviados pouco insaturados. Solos mediterrâneos pardos de materiais não calcários de xistos ou grão vaques;
14	Pc	Solos calcários pardos dos climas sub-húmidos e semi-áridos normais de calcários não compactados;
15	Al+Px	Al - Aluviossolos modernos não calcários de textura ligeira; Px - Solos argiluviados pouco insaturados. Solos mediterrâneos pardos de materiais não calcários de xistos ou grão vaques;

Quadro VII.5.1 - Classes taxonómicas do solo bacia hidrográfica da Ribeira de Alportel

As áreas de cada uma das classes taxonómicas e respectiva percentagem da área total da bacia são indicadas no quadro VII.5.2.

Areas das classes taxonómicas do solo					
Csolo (ID)	Area (m2)	Area (%)	Csolo (ID)	Area (m2)	Area (%)
1	122960000	93.15	9	200000	0.15
2	360000	0.27	10	80000	0.06
3	2160000	1.64	11	40000	0.03
4	880000	0.67	12	120000	0.09
5	400000	0.30	13	400000	0.30
6	240000	0.18	14	480000	0.36
7	2440000	1.85	15	640000	0.48
8	600000	0.45			

Quadro VII.5.2 - Áreas das classes taxonómica do solo

A textura de cada uma destas classes taxonómicas para os solos do Algarve é referida em Kopp, 1989. Estes valores estão indicados no quadro VII.5.3. Pelas percentagens de areia, silte e argila. Pelo ábaco III.2.1.3 é indicada a classificação de cada uma das classes taxonómicas segundo a classificação textural do Soil Conservation Service. Os valores referidos são valores médios de um intervalo bastante alargado de valores indicados por Kopp, 1989.

ID	Solo (SROA)	Horizonte	Prof. [cm]	>2 mm [%]	Areia grossa [%]	Areia fina [%]	Areia [%]	limo [%]	argila [%]	MO [%]	Solo (SCS)
1	Ex	A	-	-	18	18	36	27	36	-	cl
		B	-	-	10	20	30	30	40	-	cl
2	Vc+Pc										l
											l
											l
3	Vcd+Pc										cl
											cl
											cl
4	Vc	A	0-20	35	12	35	47	21	32	1.72	scl
		B	20-70	54	14	33	47	21	32	1.08	scl
		C	>70	92	-	-	-	-	-	-	
5	A	Ap	0-20	5	5	24	29	42	29	-	cl
		C	>20	5	3	27	30	43	27	-	cl
6	At	A	-	5	23	32	55	15	30	-	scl
		BC	-	21	20	32	52	13	35	-	scl
7	Vcd	A	0-20	27	10	20	30	20	50	3.57	c
		Bt	20-60	32	7	11	18	23	59	1.28	c
8	Cbc	Ap	0-25	7	22	44	66	13	21	2.93	scl
		B	25-65	17	23	29	52	21	27	0.53	scl
		B/C	>65	72	-	-	-	-	-	-	
9	Vts	A	0-20	4.5	12	60	72	12	16	1.72	sl
		B	20-65	7	7	57	64	14	22	0.39	scl
		C	>65	93	-	-	-	-	-	-	
10	Ec	A	-		18	18	36	27	36	-	cl
		B	-		10	20	30	30	40	-	cl
11	Ac	A	-	2	19	40	59	17	24	-	scl
		B/C	-	5	30	31	61	15	24	-	scl
12	Cb	A	0-25	7	22	44	66	12	22	1.4	scl
		B	25-65	17	21	29	50	22	28	0.98	scl
		C/B	>65	73	-	-	-	-	-	-	
13	Px	A	0-15	38.5	17	17	34	28	38	6.37	cl
		B2	15-35	15.5	15	17	32	28	40	2.06	cl
14	Pc	Ap	0-20	17	11	27	38	27	35	-	cl
		Bt	20-45	40	12	28	40	28	32	-	cl
15	Al+Px Al										l
		Ap	0-20	0	17	56	73	11	16	-	sl
		C	>20	0	14	61	75	10	15	-	sl

Quadro VII.5.3 - Textura dos horizontes das classes taxonómicas [2]

[2] De acordo com Kopp, 1989

Rawls, Bkensiek e Miller, 1983, efectuaram a análise de mais de 5000 solos e propõem os seguintes valores de porosidade, porosidade efectiva, altura de sucção na frente de humedecimento e conductividade hidráulica. Os valores da saturação efectiva para os solos à capacidade de campo e no ponto de emurchecimento referidos são propostos por Kopp, 1989 com base na análise de solos do Algarve. O grupo de solo hidrológico é dado em função da classificação textural do Soil Conservation Service, e nos estudos de Raws et all, 1982. Ver capítulo III.

				Parâmetros para a equação de Green Ampt						Curva numero (CN)
ID	Solo (SROA)	Horizonte	Solo (SCS)	Porosidade (adim.)	Porosidade efectiva (adim.)	Altura de sucção na frente de humedecimento (mm)	Conductividade hidráulica na frente de humedecimento (mm/hora)	Saturação efectiva (capacidade de campo) pF1.8	Saturação efectiva (ponto de emurchecimento) pF4.2	Grupo hidrologico (SCS)
1	Ex	A	cl	0.464	0.309	208.8	1.0	0.31	0.15	D
		B	cl							
2	Vc+Pc		l	0.463	0.434	88.9	3.4	0.33	0.19	C
			l							
			l							
3	Vcd+Pc		cl	0.464	0.309	208.8	1.0	0.35	0.22	D
			cl							
			cl							
4	Vc	A	scl	0.398	0.33	218.5	1.5	0.33	0.20	C
		B	scl							
		C								
5	A	Ap	cl	0.464	0.309	208.8	1.0	0.35	0.26	D
		C	cl							
6	At	A	scl	0.398	0.33	218.5	1.5	0.31	0.18	C
		BC	scl							
7	Vcd	A	c	0.475	0.385	316.3	0.3	0.39	0.27	D
		Bt	c							
8	Cbc	Ap	scl	0.398	0.33	218.5	1.5	0.35	0.20	C
		B	scl							
		B/C								
9	Vts	A	sl	0.398	0.33	218.5	1.5	0.28	0.12	D
		B	scl							
		C								
10	Ec	A	cl	0.464	0.309	208.8	1.0	0.31	0.15	D
		B	cl							
11	Ac	A	scl	0.398	0.33	218.5	1.5	0.33	0.16	C
		B/C	scl							
12	Cb	A	scl	0.398	0.33	218.5	1.5	0.35	0.20	C
		B	scl							
		C/B								
13	Px	A	cl	0.464	0.309	208.8	1.0	0.35	0.25	D
		B2	cl							
14	Pc	Ap	cl	0.464	0.309	208.8	1.0	0.32	0.18	D
		Bt	cl							
15	Al+Px		l	0.463	0.434	88.9	3.4	0.35	0.15	C
	Al	Ap	sl							
		C	sl							

Quadro VII.5.4 - Parâmetros das classes taxonómicas [3]

[3] De acordo com Rawls, Brakensiek e Miller, 1983 em Chow, 1988. Kopp, 1989. Rawls et Al. 1982 em Thomas N. Debo, 1995.

VII.6 - Usos do solo

De acordo com a carta Agrícola e Florestal de Portugal (escala 1:25000), os usos do solo na Bacia Hidrográfica da Ribeira de Alportel são os apresentados na figura VII.6.1.

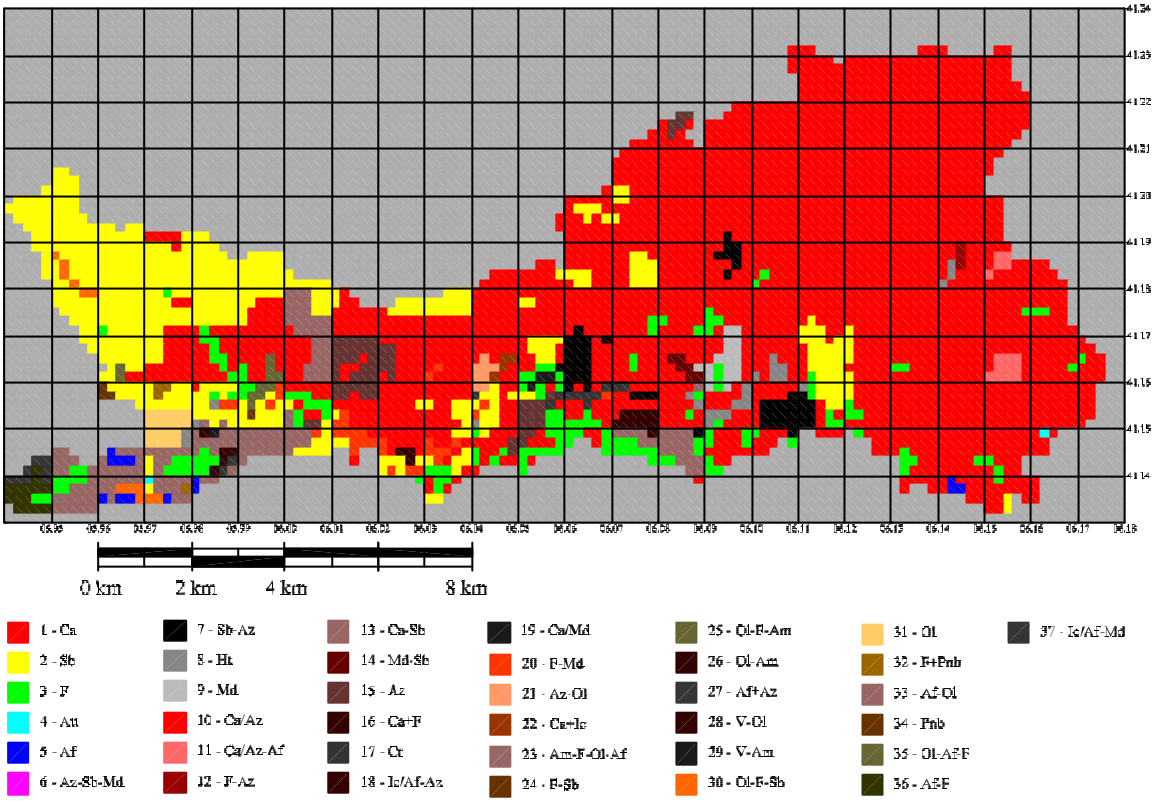


Figura VII.6.1 - Classes de uso do solo

A cada uma das referidas classes cuja distribuição espacial na bacia hidrográfica se apresenta na figura VII.6.1, corresponde o seguinte uso do solo.

ID	Classes de uso do solo	
1	Ca	Culturas arvenses de sequeiro
2	Sb	Sobreiro
3	F	Figueira
4	Au	Área urbana
5	Af	Alfarrobeira
6	Az-Sb-Md	Azinheira - Sobreiro - Medronheiro
7	Sb-Az	Sobreiro - Azinheira
8	Ht	Culturas hortícolas em regadio
9	Md	Medronheiro
10	Ca/Az	Culturas arvenses de sequeiro / Azinheira
11	Ca/Az-Af	Culturas arvenses de sequeiro / Azinheira - Alfarrobeira
12	F-Az	Figueira - Azinheira
13	Ca-Sb	Culturas arvenses de sequeiro - Sobreiro

14	Md-Sb	Medronheiro - Sobreiro
15	Az	Azinheira
16	Ca+F	Culturas arvenses de sequeiro + Figueira
17	Cr	Culturas arvenses de regadio
18	Ic/Af-Az	Inculto / Alfarrobeira - Azinheira
19	Ca/Md	Culturas arvenses de sequeiro / Medronheiro
20	F-Md	Figueira - Medronheiro
21	Az-Ol	Azinheira - Oliveira
22	Ca+Ic	Culturas arvenses de sequeiro + Inculto
23	Am-F-Ol-Af	Amendoeira - Figueira - Oliveira - Alfarrobeira
24	F-Sb	Figueira - Sobreiro
25	Ol-F-Am	Oliveira - Figueira - Amendoeira
26	Ol-Am	Oliveira - Amendoeira
27	Af+Az	Alfarrobeira + Azinheira
28	V-Ol	Vinha - Oliveira
29	V-Am	Vinha - Amendoeira
30	Ol-F-Sb	Oliveira - Figueira - Sobreiro
31	Ol	Oliveira
32	F+Pnb	Figueira + Pinheiro bravo
33	Af-Ol	Alfarrobeira - Oliveira
34	Pnb	Pinheiro Bravo
35	Ol-Af-F	Oliveira - Alfarrobeira - Figueira
36	Af-F	Alfarrobeira - Figueira
37	Ic/Af-Md	Inculto / Alfarrobeira - Medronheiro

Quadro VII.6.1 - Usos do solo

A área ocupada por cada um dos usos do solo e respectiva percentagem da área total da bacia hidrográfica referida na figura VII.6.1 e no quadro VII.6.1 é apresentada no quadro VII.6.2.

Areas das classes de uso do solo								
CUsoSolo (ID)	Area (m2)	Area (%)	CUsoSolo (ID)	Area (m2)	Area (%)	CUsoSolo (ID)	Area (m2)	Area (%)
1	81440000	61.70	14	240000	0.18	27	80000	0.06
2	20160000	15.27	15	2360000	1.79	28	40000	0.03
3	6320000	4.79	16	520000	0.39	29	40000	0.03
4	80000	0.06	17	440000	0.33	30	480000	0.36
5	520000	0.39	18	0	0.00	31	720000	0.55
6	0	0.00	19	120000	0.09	32	160000	0.12
7	2120000	1.61	20	1320000	1.00	33	320000	0.24
8	1000000	0.76	21	320000	0.24	34	120000	0.09
9	720000	0.55	22	160000	0.12	35	80000	0.06
10	4240000	3.21	23	3560000	2.70	36	560000	0.42
11	600000	0.45	24	40000	0.03	37	320000	0.24
12	120000	0.09	25	360000	0.27			
13	2160000	1.64	26	160000	0.12			

Quadro VII.6.2 - Áreas das classes de uso do solo

VII.7. Classes de infiltração

Com base nas classes taxonómicas do solo e nas classes de uso do solo são geradas classes de infiltração. Cada classe de infiltração resulta da intersecção das classes taxonómicas dos solos com as classes de uso do solo. Assim a cada classe de infiltração corresponde uma combinação de uma classe taxonómica do solo com um tipo de uso do solo. Com base nesta informação é possível atribuir propriedades a estas classes.

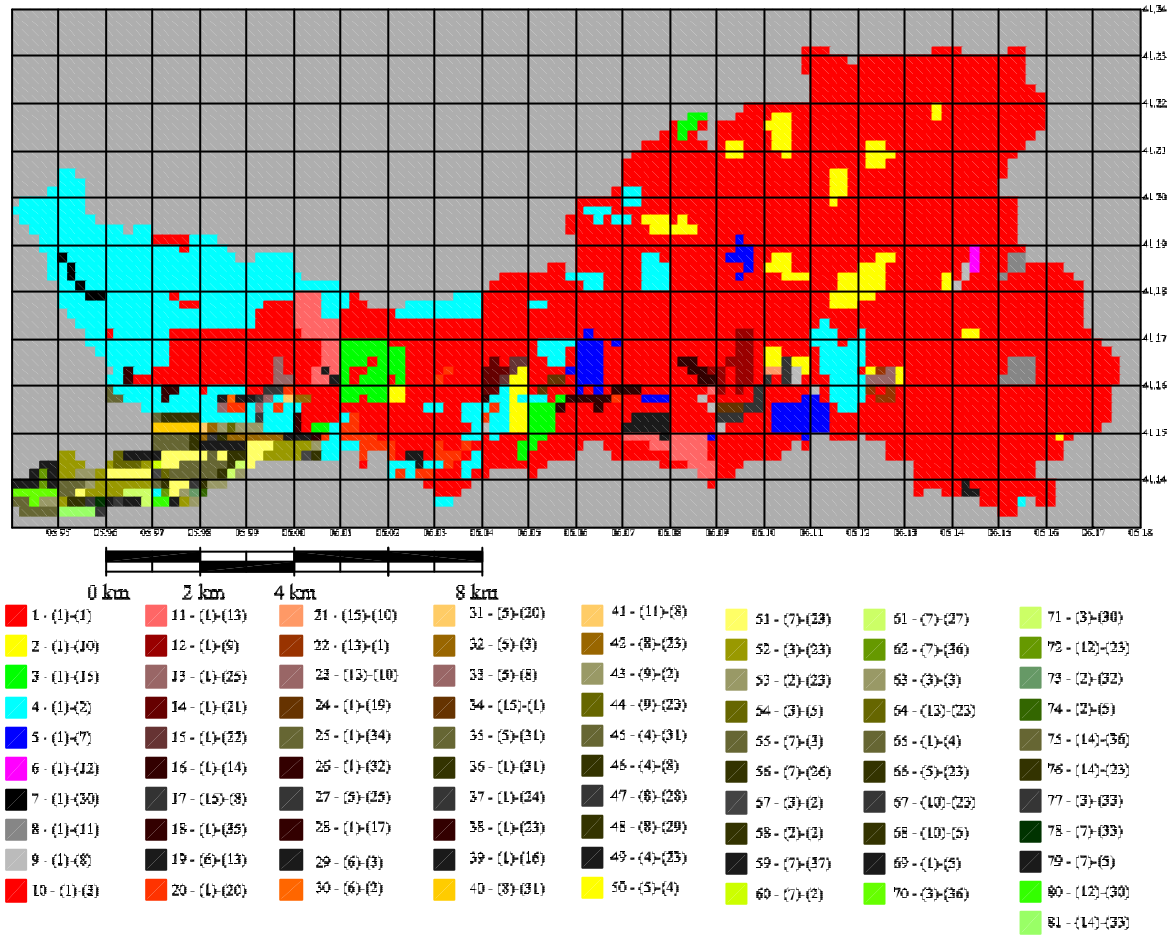


Figura VII.7.1 - Classes de infiltração

Na legenda da figura VII.7.1, o primeiro número entre parêntesis, corresponde ao número da calasse taxonómica do solo e o segundo à classe de uso do solo.

A área de cada uma das classes de infiltração e respectiva percentagem da área total da bacia hidrográfica é referida no quadro VII.7.1.

Areas das classes de infiltração														
CInfilt (ID)	CSolo (ID)	CUsoSolo (ID)	Area (m2)	Area (%)	CInfilt (ID)	CSolo (ID)	CUsoSolo (ID)	Area (m2)	Area (%)	CInfilt (ID)	CSolo (ID)	CUsoSolo (ID)	Area (m2)	Area (%)
1	1	1	81160000	61.48	28	1	17	440000	0.33	55	7	3	640000	0.48
2	1	10	4000000	3.03	29	6	3	120000	0.09	56	7	26	160000	0.12
3	1	15	2360000	1.79	30	6	2	40000	0.03	57	3	2	80000	0.06
4	1	2	19760000	14.97	31	5	20	40000	0.03	58	2	2	40000	0.03
5	1	7	2120000	1.61	32	5	3	80000	0.06	59	7	37	320000	0.24
6	1	12	120000	0.09	33	5	8	40000	0.03	60	7	2	40000	0.03
7	1	30	240000	0.18	34	15	1	120000	0.09	61	7	27	80000	0.06
8	1	11	600000	0.45	35	5	31	40000	0.03	62	7	36	80000	0.06
9	1	8	400000	0.30	36	1	31	160000	0.12	63	3	3	200000	0.15
10	1	3	5280000	4.00	37	1	24	40000	0.03	64	13	23	40000	0.03
11	1	13	2080000	1.58	38	1	23	120000	0.09	65	1	4	40000	0.03
12	1	9	720000	0.55	39	1	16	520000	0.39	66	5	23	40000	0.03
13	1	25	240000	0.18	40	8	31	200000	0.15	67	10	23	40000	0.03
14	1	21	320000	0.24	41	11	8	40000	0.03	68	10	5	40000	0.03
15	1	22	160000	0.12	42	8	23	320000	0.24	69	1	5	120000	0.09
16	1	14	240000	0.18	43	9	2	160000	0.12	70	3	36	240000	0.18
17	15	8	440000	0.33	44	9	23	40000	0.03	71	3	30	160000	0.12
18	1	35	80000	0.06	45	4	31	320000	0.24	72	12	23	40000	0.03
19	6	13	80000	0.06	46	4	8	80000	0.06	73	2	32	40000	0.03
20	1	20	1280000	0.97	47	8	28	40000	0.03	74	2	5	40000	0.03
21	15	10	80000	0.06	48	8	29	40000	0.03	75	14	36	240000	0.18
22	13	1	200000	0.15	49	4	23	480000	0.36	76	14	23	80000	0.06
23	13	10	160000	0.12	50	5	4	40000	0.03	77	3	33	120000	0.09
24	1	19	120000	0.09	51	7	23	920000	0.70	78	7	33	40000	0.03
25	1	34	120000	0.09	52	3	23	1200000	0.91	79	7	5	160000	0.12
26	1	32	120000	0.09	53	2	23	240000	0.18	80	12	30	80000	0.06
27	5	25	120000	0.09	54	3	5	160000	0.12	81	14	33	160000	0.12

Quadro VII.7.1 - Áreas das classes de infiltração

De acordo com a informação referida nos quadros III.2.1.1, III.2.2.2, VII.5.1, VII.5.3 e VII.5.4 foram atribuídas propriedades a cada uma das oitenta e uma classes de infiltração consideradas no modelo em função do tipo de solo e do seu uso. Essas propriedades estão indicadas no quadro VII.7.2.

Classe de infiltração	Classe do solos	Classe de uso do solo	Porosidade (adim.)	Porosidade efectiva (adim.)	Altura de sucção na frente de humedecimento (mm)	Condutividade hidráulica (mm/hora)	Saturação efectiva (capacidade de campo) pF1.8	Saturação efectiva (ponto de emarchecimento) pF4.2	Grupo hidrológico (SCS)	CN(AMCII)	CN(AMCI)	CN(AMCIII)
1	1	1	0.464	0.309	208.8	1.0	0.31	0.15	D	88	75	94
2	1	10	0.464	0.309	208.8	1.0	0.31	0.15	D	88	75	94
3	1	15	0.464	0.309	208.8	1.0	0.31	0.15	D	84	69	92
4	1	2	0.464	0.309	208.8	1.0	0.31	0.15	D	84	69	92
5	1	7	0.464	0.309	208.8	1.0	0.31	0.15	D	84	69	92
6	1	12	0.464	0.309	208.8	1.0	0.31	0.15	D	84	69	92
7	1	30	0.464	0.309	208.8	1.0	0.31	0.15	D	84	69	92
8	1	11	0.464	0.309	208.8	1.0	0.31	0.15	D	84	69	92
9	1	8	0.464	0.309	208.8	1.0	0.31	0.15	D	85	70	93
10	1	3	0.464	0.309	208.8	1.0	0.31	0.15	D	84	69	92
11	1	13	0.464	0.309	208.8	1.0	0.31	0.15	D	88	75	94
12	1	9	0.464	0.309	208.8	1.0	0.31	0.15	D	84	69	92
13	1	25	0.464	0.309	208.8	1.0	0.31	0.15	D	84	69	92
14	1	21	0.464	0.309	208.8	1.0	0.31	0.15	D	84	69	92
15	1	22	0.464	0.309	208.8	1.0	0.31	0.15	D	94	87	97
16	1	14	0.464	0.309	208.8	1.0	0.31	0.15	D	84	69	92
17	15	8	0.463	0.434	88.9	3.4	0.35	0.15	C	82	66	91
18	1	35	0.464	0.309	208.8	1.0	0.31	0.15	D	84	69	92
19	6	13	0.398	0.33	218.5	1.5	0.31	0.18	C	84	69	92
20	1	20	0.464	0.309	208.8	1.0	0.31	0.15	D	84	69	92
21	15	10	0.463	0.434	88.9	3.4	0.35	0.15	C	84	69	92
22	13	1	0.464	0.309	208.8	1.0	0.35	0.25	D	88	75	94
23	13	10	0.464	0.309	208.8	1.0	0.35	0.25	D	88	75	94
24	1	19	0.464	0.309	208.8	1.0	0.31	0.15	D	88	75	94
25	1	34	0.464	0.309	208.8	1.0	0.31	0.15	D	76	57	88
26	1	32	0.464	0.309	208.8	1.0	0.31	0.15	D	76	57	88
27	5	25	0.464	0.309	208.8	1.0	0.35	0.26	D	84	69	92
28	1	17	0.464	0.309	208.8	1.0	0.31	0.15	D	85	70	93
29	6	3	0.398	0.33	218.5	1.5	0.31	0.18	C	78	60	89
30	6	2	0.398	0.33	218.5	1.5	0.31	0.18	C	78	60	89
31	5	20	0.464	0.309	208.8	1.0	0.35	0.26	D	84	69	92
32	5	3	0.464	0.309	208.8	1.0	0.35	0.26	D	84	69	92
33	5	8	0.464	0.309	208.8	1.0	0.35	0.26	D	85	70	93
34	15	1	0.463	0.434	88.9	3.4	0.35	0.15	C	84	69	92
35	5	31	0.464	0.309	208.8	1.0	0.35	0.26	D	84	69	92
36	1	31	0.464	0.309	208.8	1.0	0.31	0.15	D	84	69	92
37	1	24	0.464	0.309	208.8	1.0	0.31	0.15	D	84	69	92
38	1	23	0.464	0.309	208.8	1.0	0.31	0.15	D	84	69	92
39	1	16	0.464	0.309	208.8	1.0	0.31	0.15	D	84	69	92
40	8	31	0.398	0.33	218.5	1.5	0.35	0.2	C	78	60	89
41	11	8	0.398	0.33	218.5	1.5	0.33	0.16	C	82	66	91
42	8	23	0.398	0.33	218.5	1.5	0.35	0.2	C	78	60	89
43	9	2	0.398	0.33	218.5	1.5	0.28	0.12	D	84	69	92
44	9	23	0.398	0.33	218.5	1.5	0.28	0.12	D	84	69	92
45	4	31	0.398	0.33	218.5	1.5	0.33	0.2	C	78	60	89
46	4	8	0.398	0.33	218.5	1.5	0.33	0.2	C	82	66	91
47	8	28	0.398	0.33	218.5	1.5	0.35	0.2	C	84	69	92
48	8	29	0.398	0.33	218.5	1.5	0.35	0.2	C	84	69	92
49	4	23	0.398	0.33	218.5	1.5	0.33	0.2	C	78	60	89
50	5	4	0.464	0.309	208.8	1.0	0.35	0.26	D	92	83	96
51	7	23	0.475	0.385	316.3	0.3	0.39	0.27	D	84	69	92
52	3	23	0.464	0.309	208.8	1.0	0.35	0.22	D	84	69	92
53	2	23	0.463	0.434	88.9	3.4	0.33	0.19	C	78	60	89
54	3	5	0.464	0.309	208.8	1.0	0.35	0.22	D	84	69	92
55	7	3	0.475	0.385	316.3	0.3	0.39	0.27	D	84	69	92
56	7	26	0.475	0.385	316.3	0.3	0.39	0.27	D	84	69	92
57	3	2	0.464	0.309	208.8	1.0	0.35	0.22	D	84	69	92
58	2	2	0.463	0.434	88.9	3.4	0.33	0.19	C	78	60	89
59	7	37	0.475	0.385	316.3	0.3	0.39	0.27	D	94	87	97
60	7	2	0.475	0.385	316.3	0.3	0.39	0.27	D	84	69	92
61	7	27	0.475	0.385	316.3	0.3	0.39	0.27	D	84	69	92
62	7	36	0.475	0.385	316.3	0.3	0.39	0.27	D	84	69	92
63	3	3	0.464	0.309	208.8	1.0	0.35	0.22	D	84	69	92
64	13	23	0.464	0.309	208.8	1.0	0.35	0.25	D	84	69	92
65	1	4	0.464	0.309	208.8	1.0	0.31	0.15	D	92	83	96
66	5	23	0.464	0.309	208.8	1.0	0.35	0.26	D	84	69	92
67	10	23	0.464	0.309	208.8	1.0	0.31	0.15	D	84	69	92
68	10	5	0.464	0.309	208.8	1.0	0.31	0.15	D	84	69	92
69	1	5	0.464	0.309	208.8	1.0	0.31	0.15	D	84	69	92
70	3	36	0.464	0.309	208.8	1.0	0.35	0.22	D	84	69	92
71	3	30	0.464	0.309	208.8	1.0	0.35	0.22	D	84	69	92
72	12	23	0.398	0.33	218.5	1.5	0.35	0.2	C	78	60	89
73	2	32	0.463	0.434	88.9	3.4	0.33	0.19	C	78	60	89
74	2	5	0.463	0.434	88.9	3.4	0.33	0.19	C	78	60	89
75	14	36	0.464	0.309	208.8	1.0	0.32	0.18	D	84	69	92
76	14	23	0.464	0.309	208.8	1.0	0.32	0.18	D	84	69	92
77	3	33	0.464	0.309	208.8	1.0	0.35	0.22	D	84	69	92
78	7	33	0.475	0.385	316.3	0.3	0.39	0.27	D	84	69	92
79	7	5	0.475	0.385	316.3	0.3	0.39	0.27	D	84	69	92
80	12	30	0.398	0.33	218.5	1.5	0.35	0.2	C	78	60	89
81	14	33	0.464	0.309	208.8	1.0	0.32	0.18	D	78	60	89

Quadro VII.7.2 - Propriedades das classes de infiltração

VII.8 - Tempo de concentração da bacia hidrográfica

O tempo de concentração de uma bacia hidrográfica é o tempo que uma gota de chuva que caia no ponto hidrológicamente mais afastado da bacia, leva a chegar à secção de controlo. Ou seja, decorrido este tempo toda a área da bacia está a contribuir para o escoamento.

Existem algumas fórmulas empíricas que permitem calcular o tempo de concentração de uma bacia hidrográfica e que permitem ter uma ordem de grandeza do tempo de concentração da bacia hidrográfica da Ribeira de Alportel.

VII.8.1 - Fórmula de Kirpich

$$Tc = 0.39 \cdot \left(\frac{E}{S_3} \right)^{0.385}$$

sendo:

Tc tempo de concentração em horas;

E comprimento da linha de água principal em km;

S_3 declividade equivalente constante do rio em %.

Substituindo, vem:

$$Tc = 0.39 \cdot \left(\frac{48.61^2}{0.006279 \cdot 100} \right)^{0.385} = 9.28 \ horas$$

VII.8.2 - Fórmula de Ven Te Chow

$$Tc = 0.8773 \cdot \left(\frac{E}{\sqrt{S_3}} \right)^{0.64}$$

sendo:

E comprimento da linha de água principal em km;

S_3 declividade equivalente constante em m/km;

Substituindo, vem:

$$Tc = 0.8773 \cdot \left(\frac{48.61}{\sqrt{6.270}} \right)^{0.64} = 5.85 \ horas$$

VII.8.4 - Fórmula de Picking

$$Tc = 0.088333 \cdot \left(\frac{E^2}{S_3} \right)^{0.333}$$

sendo:

E comprimento da linha de água principal em km;

S_3 declividade equivalente constante em m/m;

Substituindo, vem:

$$Tc = 0.088333 \cdot \left(\frac{48.51^2}{0.006279} \right)^{0.333} = 6.35 \ \ horas$$

VII.8.5 - Fórmula de Temez

$$Tc = 0.3 \cdot \left(\frac{E}{S_3^{0.25}} \right)^{0.76}$$

sendo:

E comprimento da linha de água principal em km;

S_3 declividade equivalente constante em percentagem;

Substituindo, vem:

$$Tc = 0.3 \cdot \left(\frac{48.61}{.6279^{0.25}} \right)^{0.76} = 6.27 \ \ horas$$

Fórmula	Tempo de concentração (horas)
Kirpich	9.28
Ven Te Chow	5.85
Picking	6.35
Temez	6.27

Quadro VII.8.1 - Quadro resumo dos tempos de concentração

Atendendo aos valores fornecidos por estas fórmulas empíricas, estima-se que o tempo de concentração da Ribeira de Alportel será de aproximadamente 7 horas.

VII.9 - Fotos da bacia hidrográfica

Fotografia VII.9.1 - Cabeceira da Ribeira de Alportel

Fotografia VII.9.2 - Aspecto de uma zona de cabeceira

Fotografia VII.9.3 - Início de uma linha de água

Fotografia VII.9.4 - Aspecto do uso do solo

Fotografia VII.9.5 - Leito da Ribeira de Alportel

Fotografia VII.9.6 - Leito na secção de controlo

Fotografia VII.9.7 - Estação hidrométrica de Bodega

VIII - Aplicação do modelo à bacia hidrográfica da Ribeira de Alportel

Como caso prático de aplicação do modelo desenvolvido escolheu-se, como foi referido, a bacia hidrográfica da Ribeira de Alportel. Visto ser uma bacia de média dimensão, com 132 km^2 de área, instrumentada pela estação hidrométrica de Bodega e com a estação udométrica de São Brás de Alportel localizada na sua cabeceira.

Esta ribeira é conhecida pelas suas cheias violentas que causam inundações cíclicas na cidade de Tavira.

O primeiro passo na aplicação do modelo à bacia hidrográfica da Ribeira de Alportel foi obter o modelo digital do terreno para a região em estudo. Observando a morfologia da bacia considerou-se que uma malha regular de 200x200 m, com células de 4 ha é suficiente para ter uma adequada aproximação da variabilidade espacial da topografia, dos solos e dos seus usos.

O modelo digital do terreno que se encontra disponível no "s*ite*" da Direcção Regional do Ambiente não permite a resolução compatível com o objectivo deste trabalho.

Assim o modelo digital do relevo utilizado foi obtido com base nas Cartas Militares de Portugal nº 598 e 599 à escala 1/25 000. Com a resolução de 200x200 m, são necessários 25 pontos por km^2. Para os 132 km^2, foram retirados 3300 pontos localizados nos centros de gravidade da células. O modelo digital do terreno definido por uma matriz com 55 linhas e 120 colunas em que os pontos que não pertencem à bacia hidrográfica contêm o código -1 em vez do valor da cota do respectivo ponto. Esta matriz pode ser convertida numa imagem cuja representação se faz na figura VII.1.

Aplicando o método descrito no capítulo VI para gera a rede, em que em cada célula tem origem uma linha de água e a direcção desta é a do maior declive, obtém-se a rede hidrográfica representada na figura VII.1.

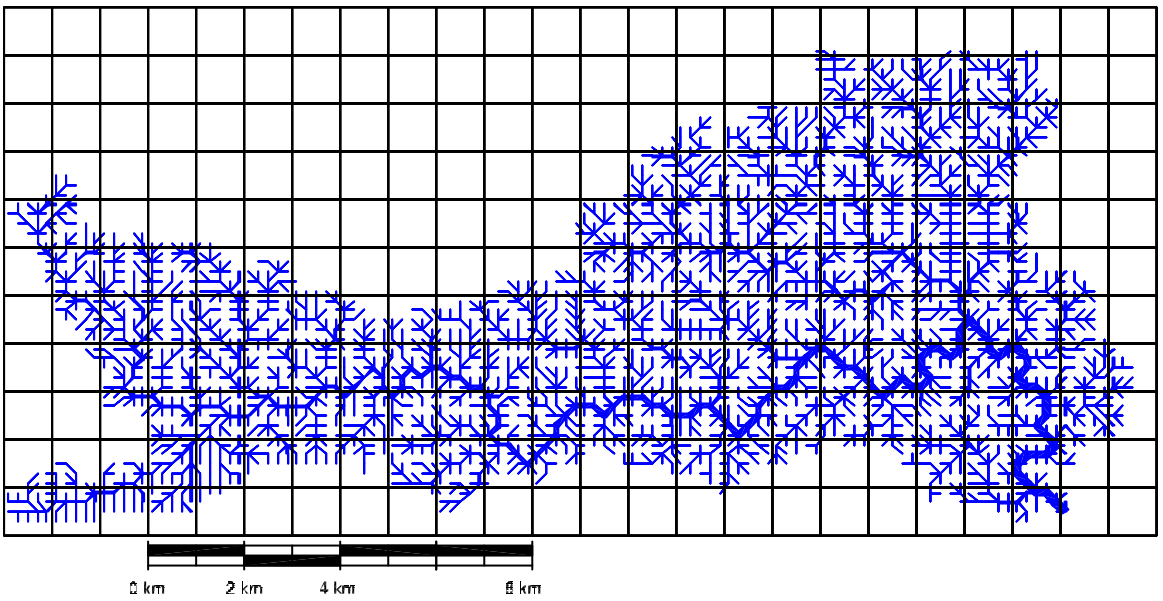


Figura VIII.1 - Discretização da rede hidrográfica da Ribeira de Alportel

Células de 200x200 m

O coeficiente de sinuosidade adicional determinado para a rede hidrográfica discretizada com base na resolução de 200x200 m foi de 1.27, ver capítulo VI.

Para efectuar a análise de sensibilidade à dimensão da célula, a mesma rede hidrográfica foi discretizada tendo como base o modelo digital do relevo com a dimensão das células de 400x400 m. A rede hidrográfica assim obtida é apresentada na figura VIII.2.

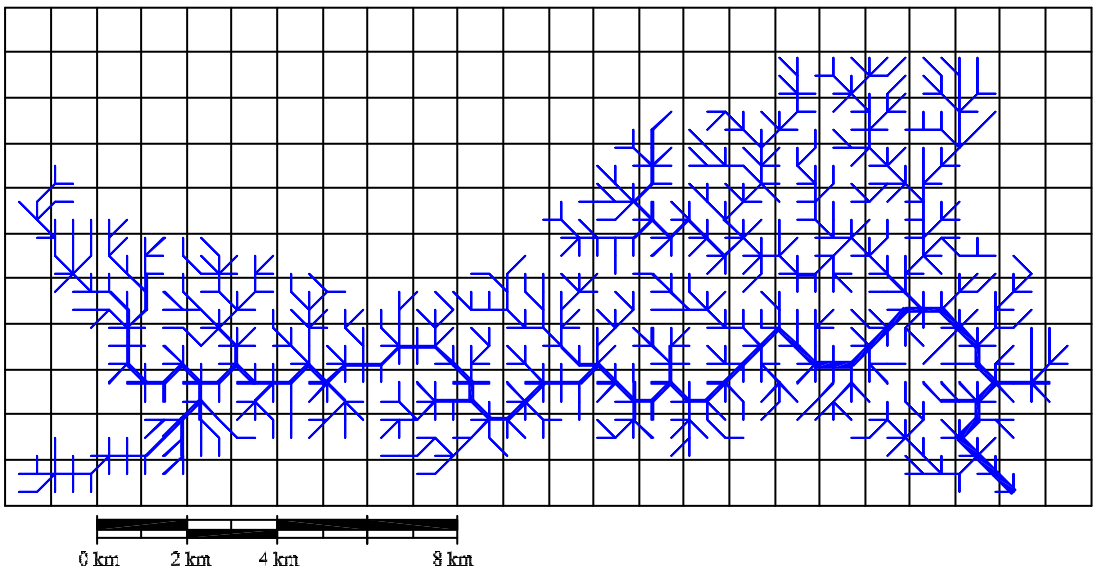


Figura VIII.2 - Discretização da rede hidrográfica da Ribeira de Alportel

Células de 400x400 m

O coeficiente de sinuosidade adicional determinado para a rede hidrográfica discretizada com base na resolução de 400x400 m foi de 1.42, ver capítulo VI.

VIII.1 - Cenário 1 - chuva efectiva uniforme, constante e de longa duração

Como primeiro cenário para a aplicação do modelo considerou-se uma chuva que gerou uma precipitação efectiva de 10 mm por hora, uniformemente distribuída sobre toda a bacia durante um intervalo de tempo superior ao tempo de concentração da bacia hidrográfica.

Por forma a efectuar a análise de sensibilidade dos resultados do modelo ao incremento de tempo Dt, efectuou-se a simulação para Dt de 200 s, 600 s, 1800 s, 3600 s e 5400 s. São apresentados os hidrogramas obtidos pela resolução numérica da equação da onda cinemática pelo método linear e pelo método não linear, ver capítulo V. Os coeficientes de rugosidade de Manning-Strickler são de 4.0 $m^{1/3}/s$ para os troços de ordem 1 e de 25.0 $m^{1/3}/s$ para o troço de ordem máxima situado na secção de controlo.

Este cenário é fictício e contorna o efeito da infiltração na resposta da bacia a um evento meteorológico, servindo única e exclusivamente para:

- observar o comportamento da equação da Onda Cinemática na rede hidrográfica da Ribeira de Alportel;

- calibrar os coeficientes de rugosidade de Manning-Strickler por forma que o tempo que o caudal leva a estabilizar seja igual ao tempo de concentração da bacia;

- verificar se o caudal na secção de controlo estabilizado é igual à intensidade de precipitação vezes a área da bacia, ou seja, como para valores de t superiores ao tempo de concentração T_c, toda a bacia está a contribuir para o caudal na secção de controlo, o volume que sai da bacia por unidade de tempo é igual ao volume que entra na bacia por unidade de tempo e o caudal estabilizado terá que ser igual a:

$$Q = I \cdot A$$

sendo:

I intensidade de precipitação;

A área da bacia hidrográfica.

neste cenário, para 10 mm de chuva efectiva por hora, vem:

$$Q = \frac{10}{1000 \cdot 3600} \cdot 132 \cdot 10^6 = 366.66 \ \text{m}^3/\text{s}$$

Para o modelo digital do terreno em que a dimensão da células é de 200x200 m, os hidrogramas obtido na secção de controlo para os vários valores de Δt são os seguintes.

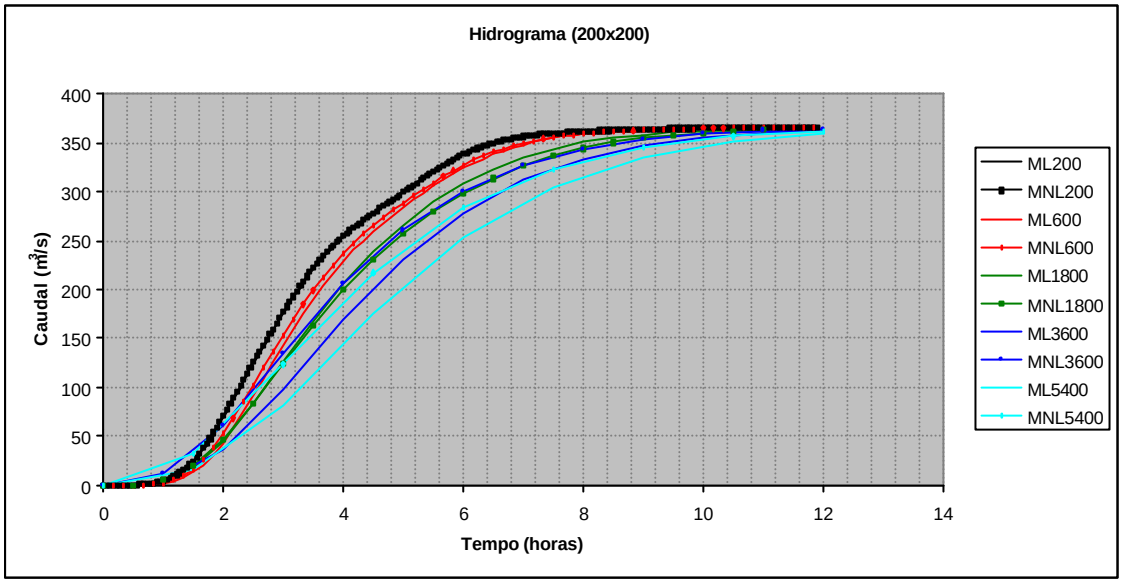


Figura VIII.1.1 - Hidrogramas na secção de controlo - dimensão da célula 200x200

A designação ML significa que a resolução da equação da onda cinemática foi determinada pelo método linear e MNL significa que foi empregue o método não linear, ver capítulo V.

Observando o hidrograma obtido com base no modelo distribuído na secção de controlo, verifica-se que o caudal estabiliza após 7 horas, valor do tempo de concentração da bacia e que o caudal estabilizado é de 366.3 m^3/s. Valores que satisfazem plenamente, visto o valor do tempo de concentração calculado por várias formulas empíricas é de 7 horas. Em relação ao caudal estabilizado, o erro relativo percentual é de:

$$e = \frac{|366.66 - 366.3|}{366.66} \cdot 100 = 0.1\%$$

Na figura V.1.1, pode observar-se que com o aumento do Δt, verifica-se uma maior atenuação da onda cinemática e que quando se verifica atenuação da onda cinemática por divergência numérica, os dois métodos distintos utilizados na resolução da equação da onda

cinemática dão resultados diferentes. Para valores de Δt inferiores ou iguais a 200 s, constata-se que para efeitos práticos a solução dada pelos dois métodos é idêntica.

Por forma a efectuar a análise da sensibilidade do modelo à variação da dimensão da célula, o mesmo cálculo efectuado com base no modelo digital do terreno com resolução de 400x400 m foi o apresentado na figura VIII.1.2.

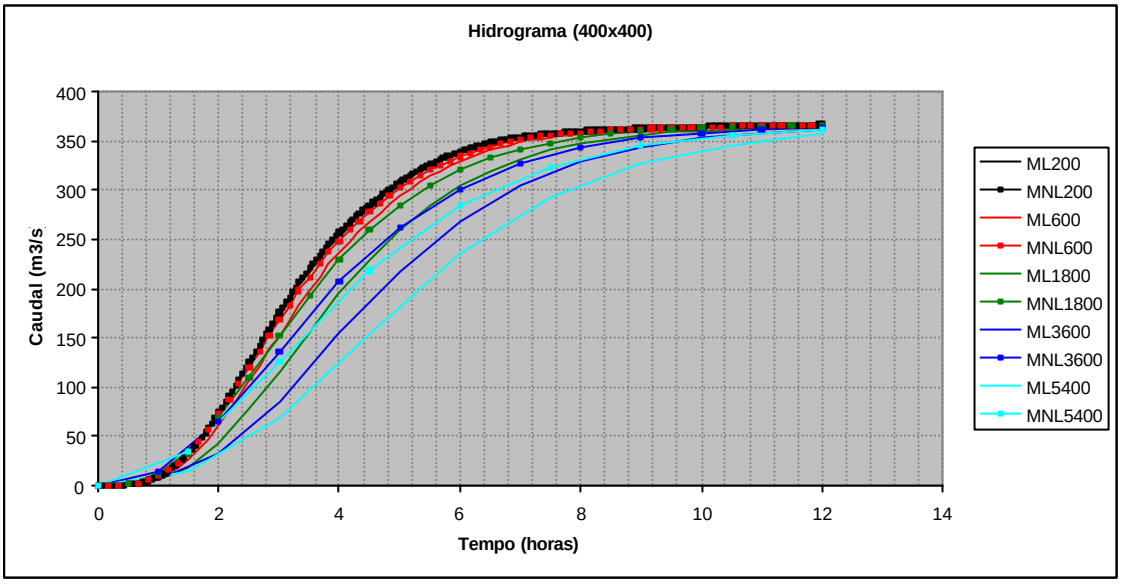


Figura VIII.1.2 - Hidrogramas na secção de controlo - dimensão da célula 400x400

Comparando os gráficos VIII.1.1 e VIII.1.2, verifica-se que o tempo que o caudal leva a estabilizar, para o cálculo efectuado com Δt igual a 200s, é sensivelmente o mesmo, não existindo uma diferença significativa entre os resultados obtidos com modelos digitais do terreno com diferentes dimensões da célula.

Um factor decisivo para que estas diferenças não sejam significativas é o coeficiente de sinuosidade adicional, introduzido no modelo desenvolvido, ver capítulo VI.

VIII.1.1 - Áreas de contribuição

Na figura VIII.1.1.2 é representada a azul a área da bacia hidrográfica que está a contribuir para a caudal na secção de controlo, ou seja, a precipitação efectiva gerada no instante inicial nas células representadas a azul já atingiu a secção de controlo, contribuindo para aumentar o caudal que se verifica nesta secção.

No cálculo das áreas de contribuição utilizou-se: passo de cálculo Δt de 200 s; modelo digital do terreno com resolução de 200x200 e precipitação efectiva *Pe* de 10 mm/hora.

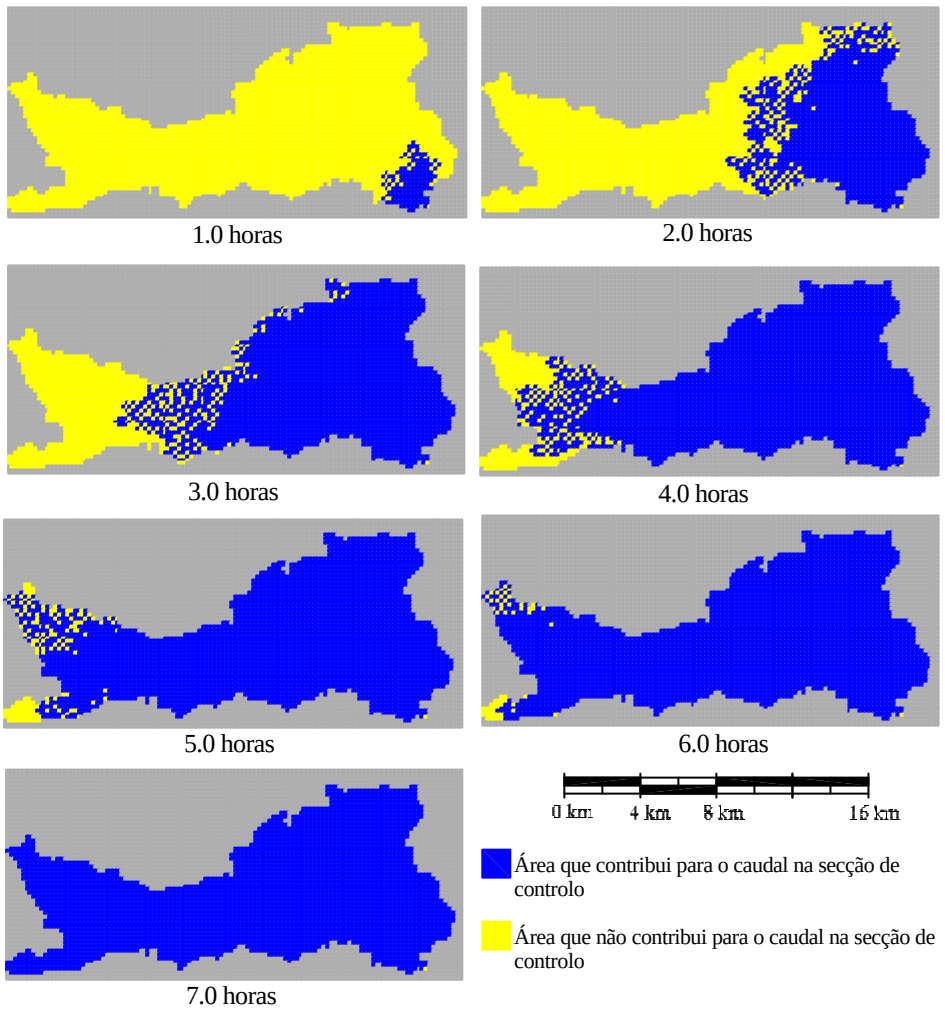


Figura VIII.1.1.1 - Áreas de contribuição

VIII.1.2 - Constância do tempo de concentração

Por forma a testar a constância do tempo de concentração da bacia, efectuou-se o cálculo, com Dt igual a 200 s e utilizou-se o modelo digital do terreno com dimenção da célula de 200x200 m.

Traçando os hidrogramas obtidos, para valores de 2, 5, 10 e 20 mm/hora de precipitação efectiva, verifica-se que o caudal tende a estabilizar em menos tempo, para valores mais altos de precipitação efectiva. Isto é justificável pela teoria da Onda Cinemática, visto que a celeridade desta é maior para caudais maiores. Contudo, como pode ser observado, esta variação não é significativa. Para caudais máximos entre 732 e 73 m^3/s, a variação obtida do tempo de concentração é de aproximadamente uma hora. Pode-se considerar que esta variação não é significativa, o que torna válido o pressuposto da teoria do hidrograma unitário em que o tempo de concentração é independente da precipitação ou das

condições do solo, como por exemplo o teor em água no solo imediatamente antes de começar a chover, sendo portanto uma característica intrínseca da bacia.

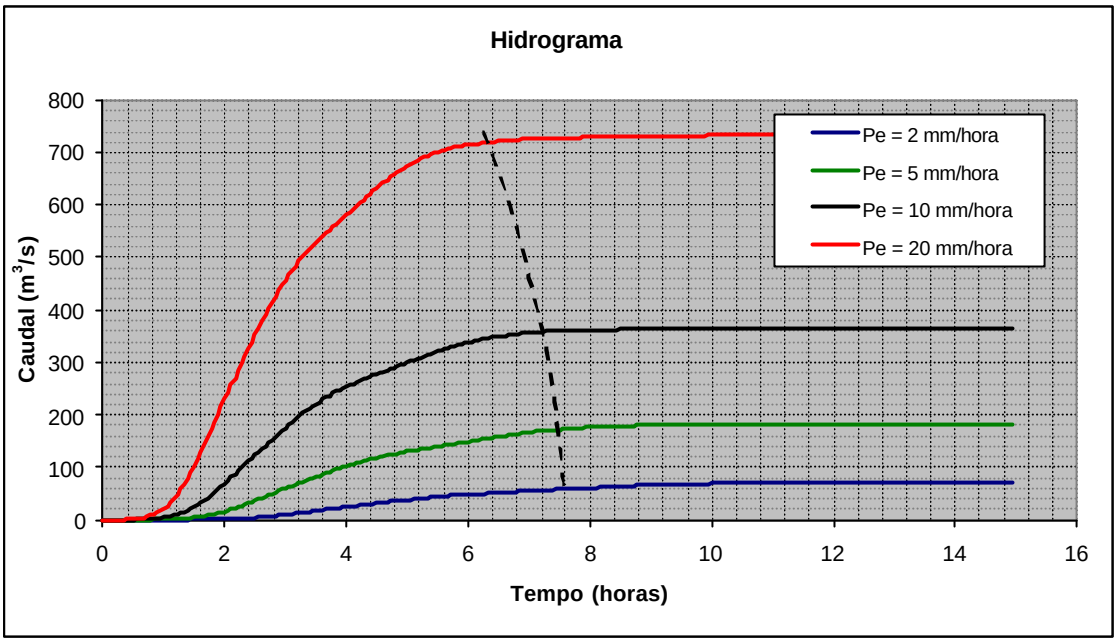


Figura VIII.1.2.1 - Hidrogramas na secção de controlo (Pe = 2, 5, 10 e 20 mm/hora)

VIII.2 - Cenário 2 - Escoamento de 9 a 14 de Dezembro de 1995

O objectivo deste cenário é simular os caudais observados na secção hidrométrica de Bodega entre as 10:00 horas do dia 9 de Dezembro de 1995 e as 24:00 horas do dia 14 de Dezembro de 1995.

As precipitações horárias observadas nas estações hidrométrica de S. Brás de Alportel, Faro e Vila Real de Santo António estão representadas nos hietogramas da figura VIII.2.1.

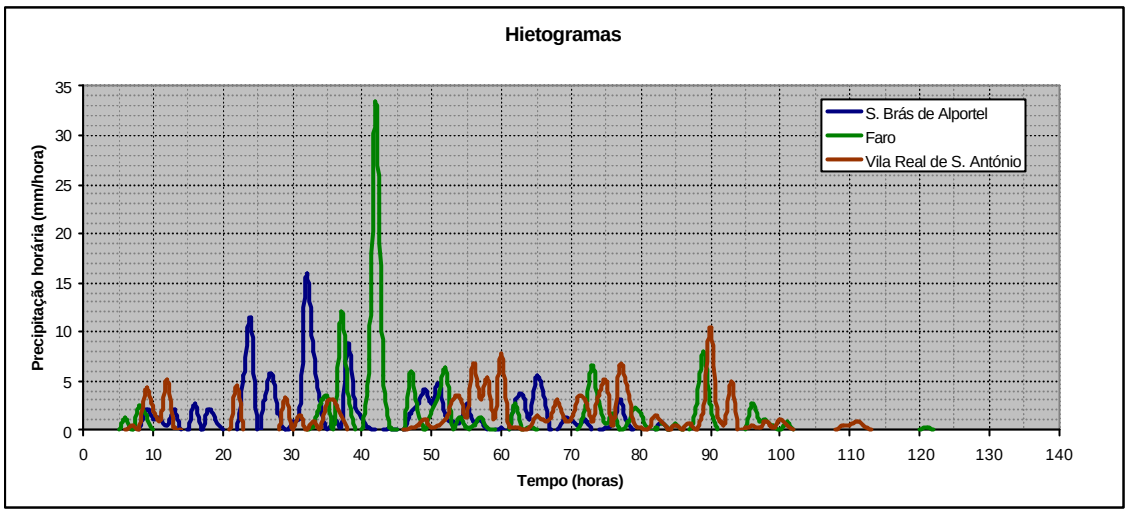


Figura VIII.1.2.1 - Precipitação horária observada nas estações udográficas

Neste mesmo período, as altura hidrométricas observadas na estação hidrométrica de Bodega e respectivos caudais são apresentados na figura VIII.1.2.2.

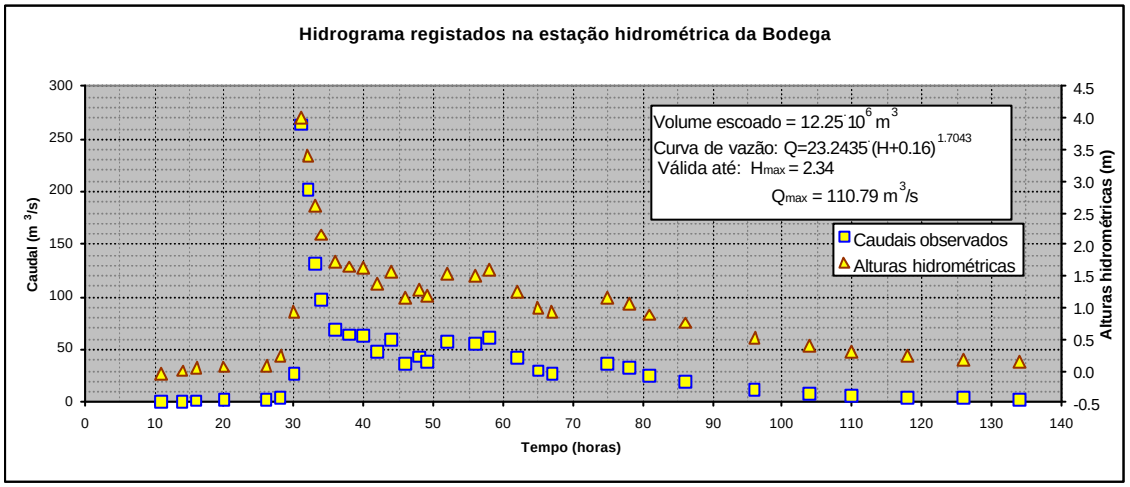


Figura VIII.1.2.2 - Hidrograma observado na estação hidrométrica de Bodega

Convem referir que a curva de vazão válida para este período, só é válida para alturas hidrométricas até 2.34 m, pelo que caudais superiores a 110.78 m^3/s são indicados no gráfico mas perdem o devido rigor.

Por integração numérica do hidrograma observado, foi determinado o volume escoado no período em estudo, pelo que: $Ve = 12.25 \cdot 10^6$ m^3.

Com base no método descrito no capítulo III, é calculada a distribuição espacial da precipitação. Na sequência do cálculo, é calculado um hietograma para cada célula. Da integração dos hietogramas em todas as células, resulta que o volume precipitado sobre a bacia no período em estudo é de $17.9 \cdot 10^6$ m^3, pelo que o coeficiente de escoamento é de:

$$C_e = \frac{12.25 \cdot 10^6}{17.90 \cdot 10^6} = 0.68$$

Os valores das propriedades das classes dos solos referidos na bibliografia e indicados no capítulo VII foram aferidos por forma a que o volume de precipitação efectiva gerado ao longo do período em estudo fosse idêntico ao volume escoado.

Em relação ao método da Curva Número, como pelos registos pluviométricos dos dias anteriores, não chovia desde o dia 28 de Novembro, considerou-se a condição antecedente de humidade do solo AMCII. Os valores de CN arbitrados com base na bibliografia mostraram-se praticamente correctos. A única correcção que foi efectuada para o volume de precipitação efectiva ser igual ao volume escoado foi multiplicar os valores de CN(AMCII) referidos no quadro VII.7.2 por 0.98.

Quanto à equação de Green-Ampt, embora esta equação seja mais precisa, também requer o conhecimento de algumas propriedades físicas dos solos. A informação que consta na bibliografia é pouco precisa, pois os valores destas propriedades podem variar consideravelmente para o mesmo solo. Outro problema que surge no uso desta equação é que não existe nenhum parâmetro que permita considerar o efeito do uso do solo, factor que influência consideravelmente a infiltração. Para ajustar o volume de precipitação efectiva, considerou-se a situação de o solo estar à capacidade de campo pF1.8 e os valores da conductividade hidráulica referidos no quadro VII.7.2 foram multiplicados por 0.175. Todos os outros parâmetros da equação de Green-Ampt foram os referidos no referido quadro.

Com base no hietograma calculado para cada célula e nas propriedades da classe de infiltração da respectiva célula é determinado o hietograma de precipitação efectiva pelo método da Curva Número do Soil Conservation Service e pela equação de Green-Ampt.

A titulo ilustrativo são apresentados os hietogramas de precipitação e precipitação efectiva determinada pelos dois métodos para cinco células com posição aleatória na bacia.

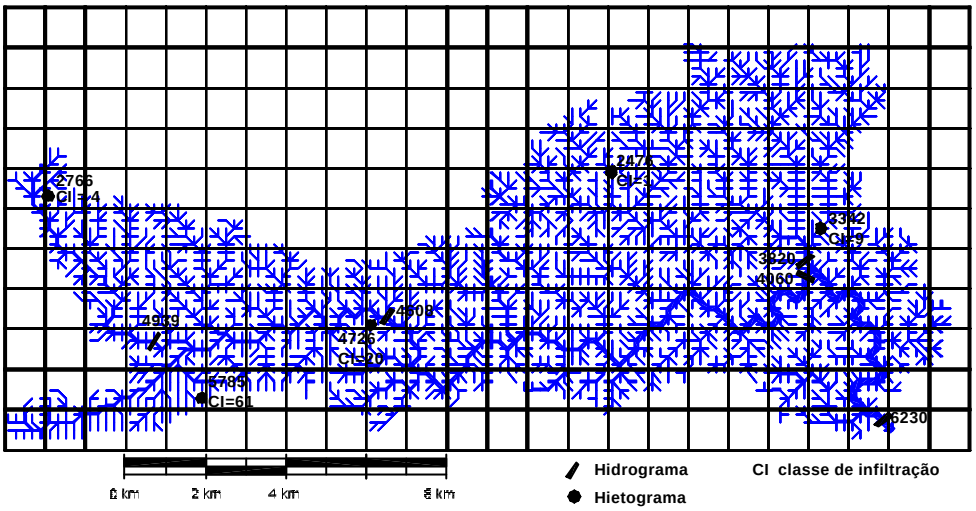


Figura VIII.1.2.3 - Localização das células utilizadas para controlo de resultados

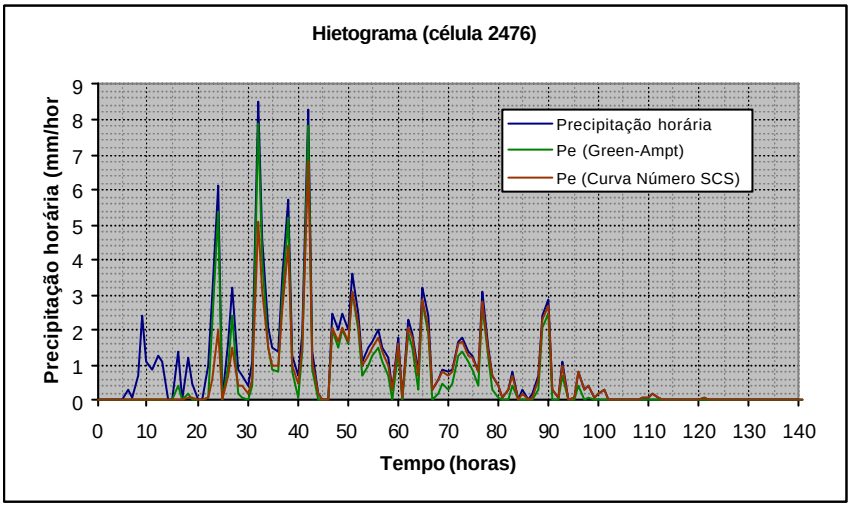


Figura VIII.1.2.4 - Hietograma de precipitação/precipitação efectiva horária - célula 2476

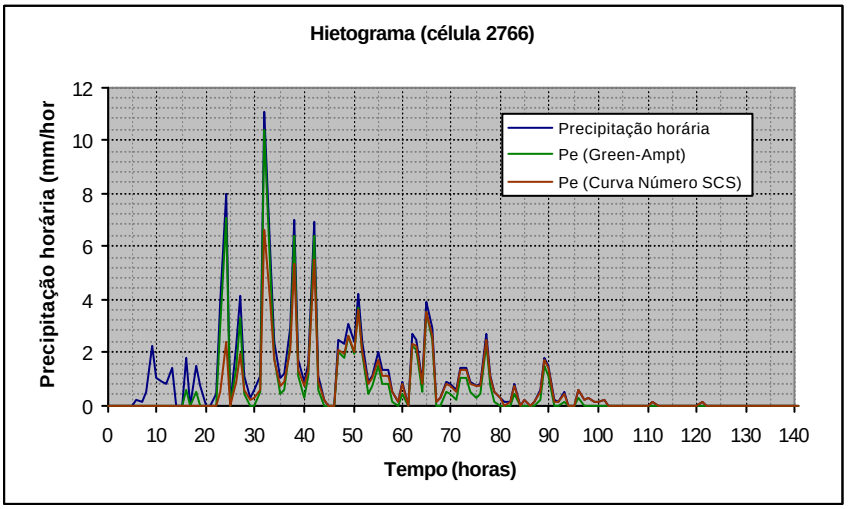


Figura VIII.1.2.5 - Hietograma de precipitação/precipitação efectiva horária - célula 2766

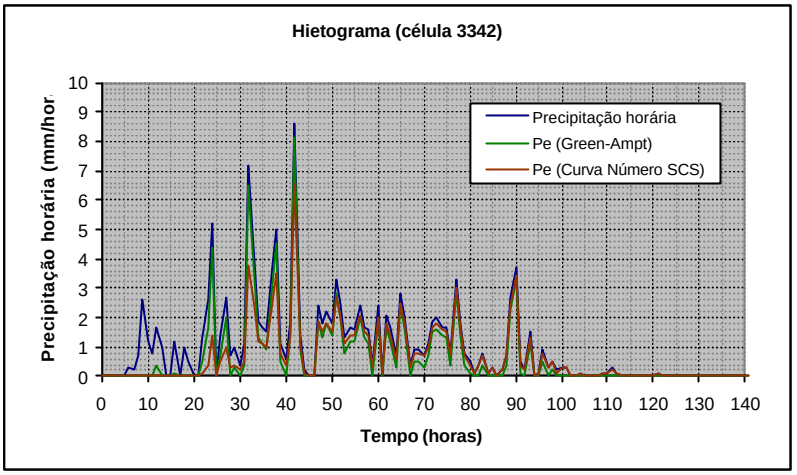


Figura VIII.1.2.6 - Hietograma de precipitação/precipitação efectiva horária - célula 3342

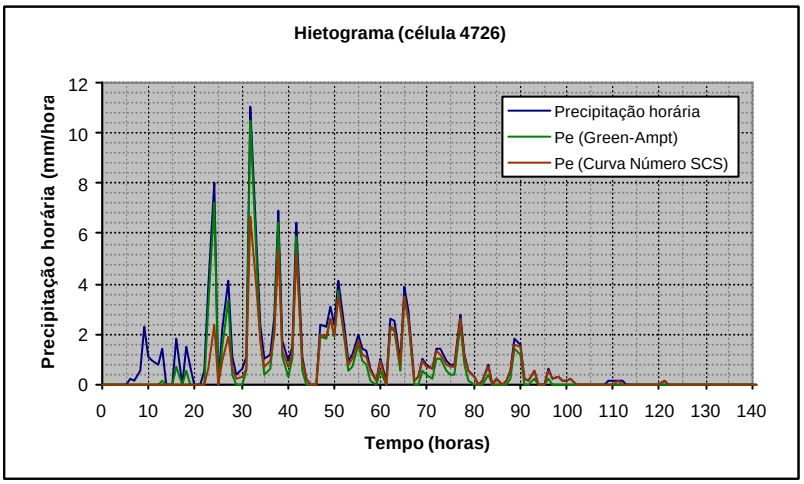


Figura VIII.1.2.7 - Hietograma de precipitação/precipitação efectiva horária - célula 4726

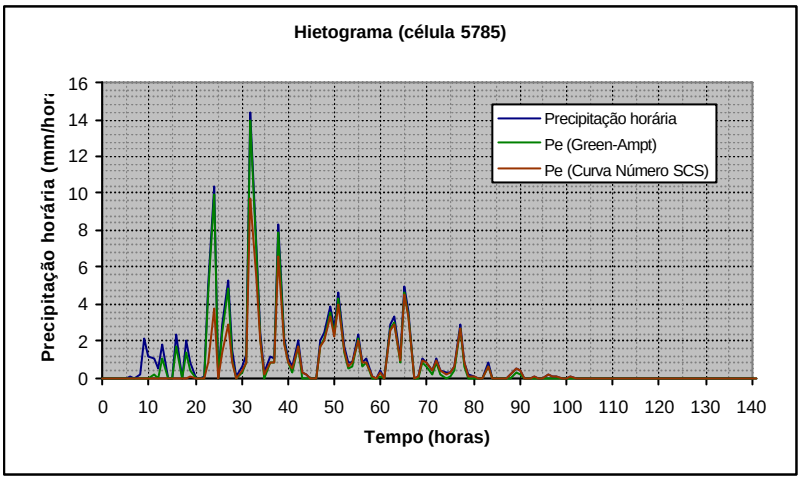


Figura VIII.1.2.8 - Hietograma de precipitação/precipitação efectiva horária - célula 5785

Com a precipitação efectiva horária determinada, são calculados os caudais de percurso de todos os troços da rede hidrográfica. A modelação do escoamento na rede hidrográfica é efectuada com base no modelo de Onda Cinemática.

Os caudais são calculados para todos os troços em todos os instantes. Para ilustrar o comportamento do modelo apenas são mostrados os resultados em algumas secções.

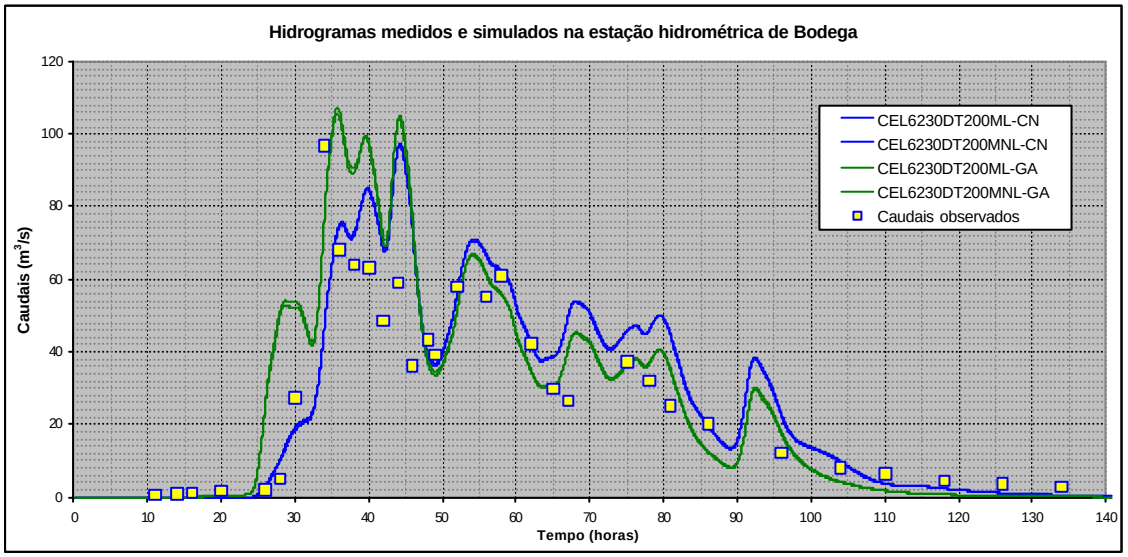


Figura VIII.1.2.9 - Hidrogramas calculados e observados na estação hidrométrica de Bodega - célula 6230

A diferença que se verifica é essencialmente devida às estações udométricas de Faro e Vila Real de Santo António estarem demasiado afastadas da bacia hidrográfica. Como é

sabido, precipitações mais intensas são de curta duração e são espacialmente mal distribuídas. Dai se deve a diferença entre os caudais observados e simulados.

De qualquer modo, e principalmente no segundo e terceiro dia, em que as chuvas são menos intensas, os caudais simulados e calculados praticamente coincidem. Para melhor aferir o modelo seria necessário que existisse pelo menos uma estação udométrica situada dentro da bacia hidrográfica, preferencialmente o mais próximo possível do seu centro de gravidade..

Num modelo distribuído, o escoamento é calculado para todas as secções da rede hidrográfica. Se os hidrogramas calculados e observados na secção de controlo forem semelhantes, podemos afirmar que os hidrogramas cálculados em todas as secções da rede hidrográfica também se aproximam dos caudais reais não observados. A titulo ilustrativo são apresentados os hidrogramas calculados em algumas secções da rede hidrográfica no interior da bacia hidrográfica.

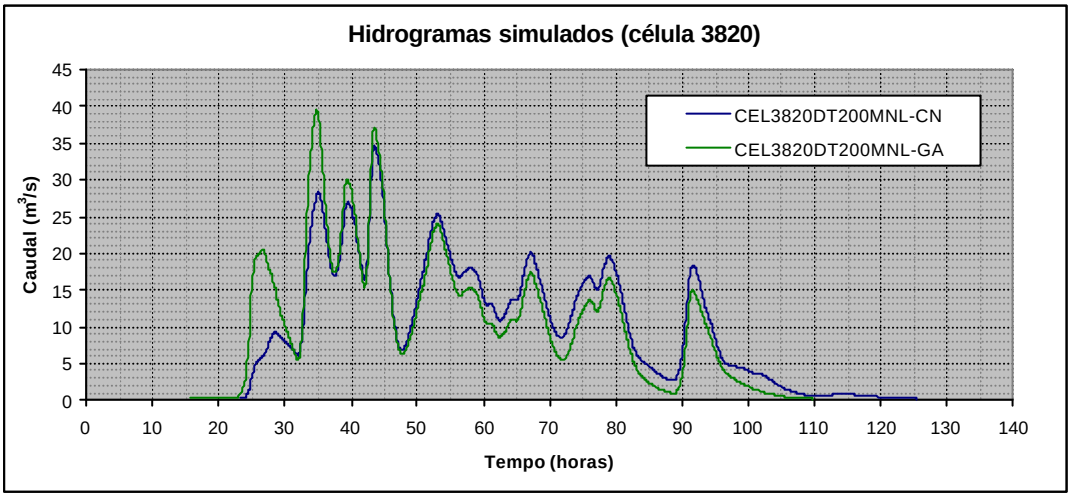


Figura VIII.1.2.10 - Hidrogramas calculados - célula 3820

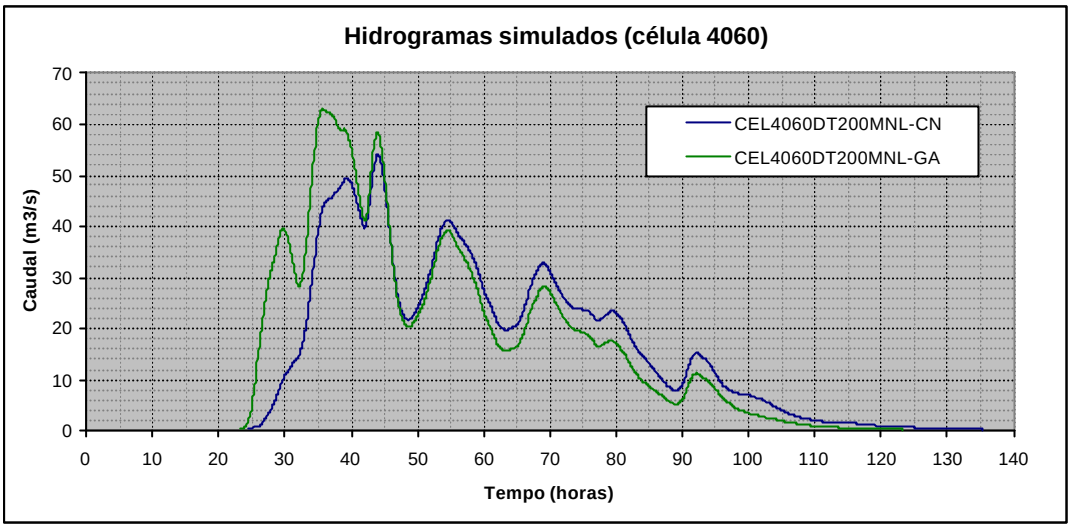


Figura VIII.1.2.10 - Hidrogramas calculados - célula 4060

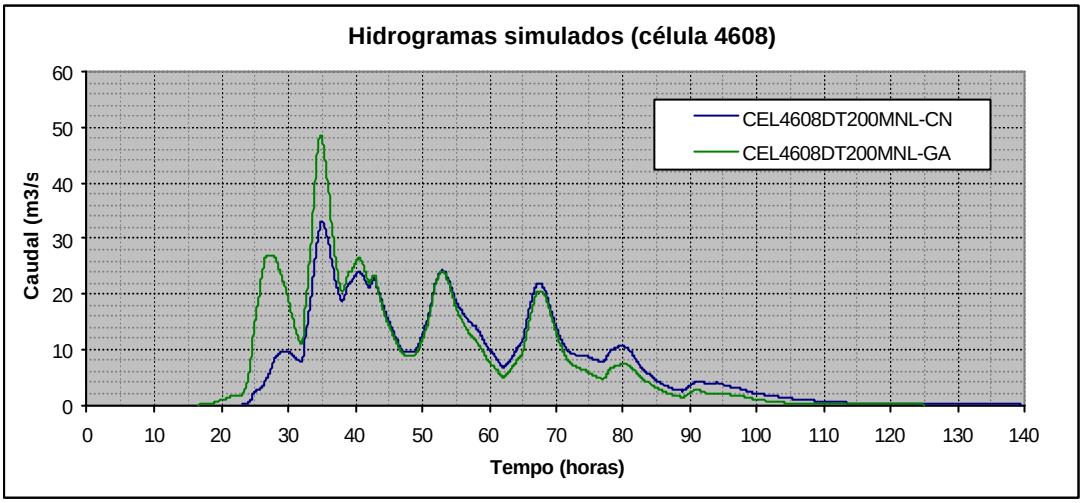


Figura VIII.1.2.10 - Hidrogramas calculados - célula 4608

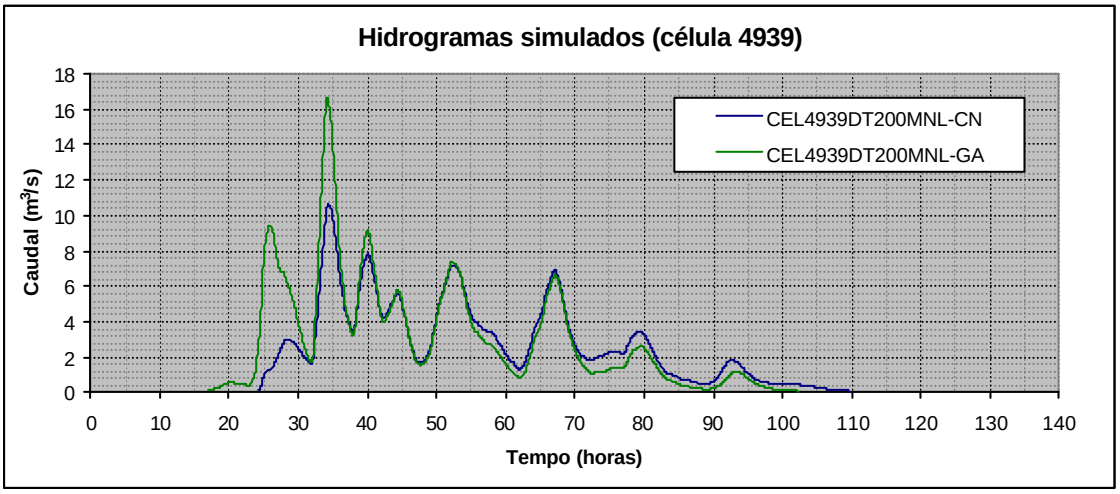


Figura VIII.1.2.10 - Hidrogramas calculados - célula 4939

VIII.1.3 - Cenário III - Cálculo de hidrogramas de cheias para vários períodos de retorno com base em curvas IDF

Neste cenário pretende-se determinar os hidrogramas de cheia que se verificam por resposta a precipitações dadas pelas curvas IDF para tempo de retorno de 50, 100, 500 e 1000 anos.

As curvas IDF (Intensidade-Duração-Frequência) de acordo com Brandão, 1998 determinadas com base em séries de dados da estação udométrica de São Brás de Alportel .

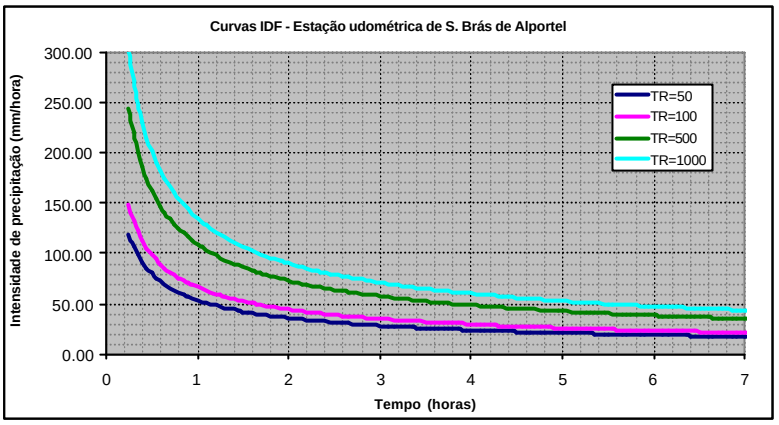


Figura VIII.1.3.1 - Curvas IDF para São Brás de Alportel

O cálculo da precipitação efectiva foi executado com base no método da curva numero do Soil Conservation Service para a condição anterior de humidade do solo AMCIII.

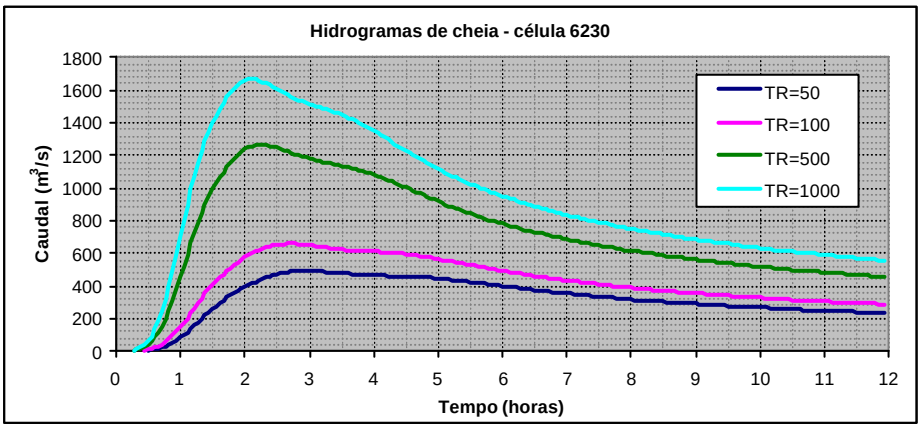


Figura VIII.1.3.2 - Hidrogramas de cheia para períodos de retorno de 50, 100, 500 e 1000 anos - célula 6230

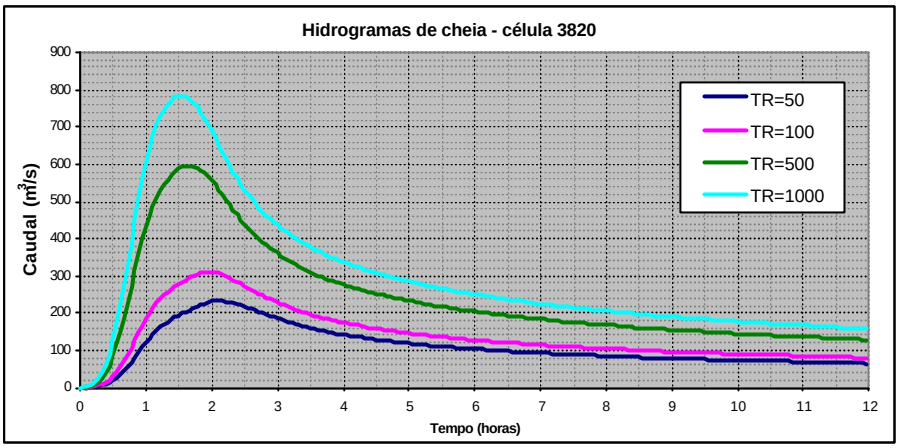


Figura VIII.1.3.3 - Hidrogramas de cheia para períodos de retorno de 50, 100, 500 e 1000 anos - célula 3820

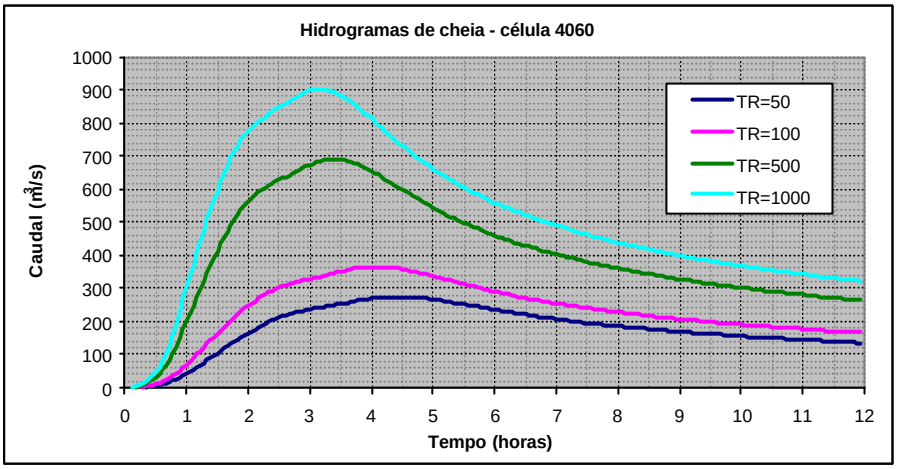


Figura VIII.1.3.4 - Hidrogramas de cheia para períodos de retorno de 50, 100, 500 e 1000 anos - célula 4060

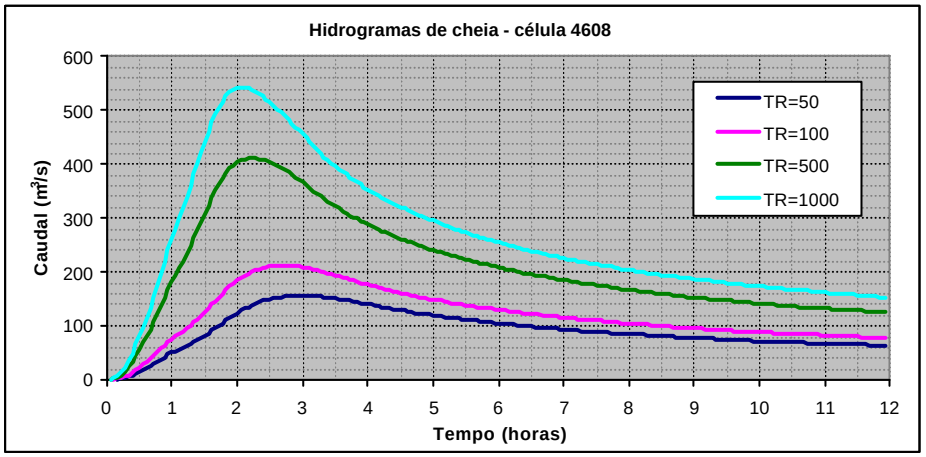


Figura VIII.1.3.5 - Hidrogramas de cheia para períodos de retorno de 50, 100, 500 e 1000 anos - célula 4608

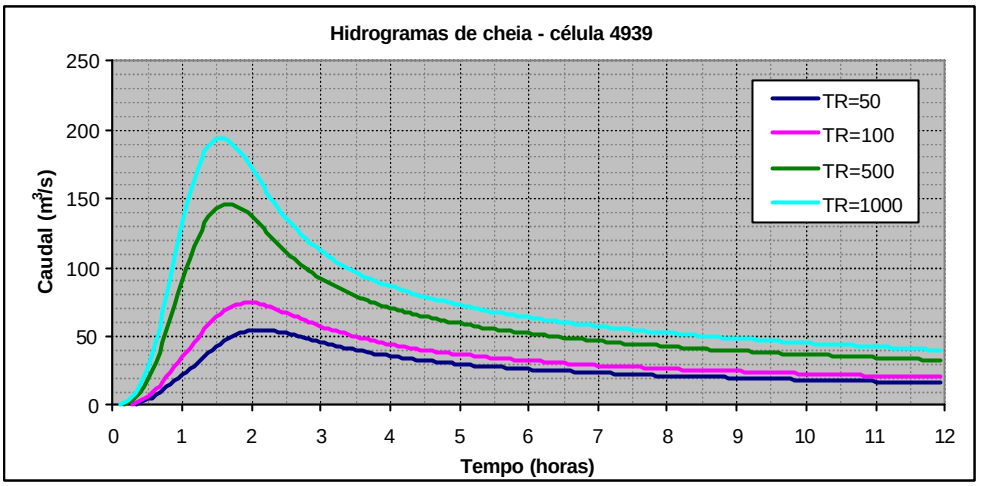


Figura VIII.1.3.6 - Hidrogramas de cheia para períodos de retorno de 50, 100, 500 e 1000 anos - célula 4939

Os hidrogramas de cheia apresentados anteriormente são determinados com base no pressuposto de a precipitação cuja intensidade é dada pelas curvas IDF ser uniformemente distribuída por toda a área da bacia hidrográfica, o que é pouco provável. Todavia como os estudos da relação intensidade/duração/frequência se baseiam em séries de dados recolhidos num único ponto, pouco se sabe sobre a distribuição espacial de chuvas de grande intensidade.

Neste estudo, divide-se a bacia hidrográfica em três partes, como representado na figura

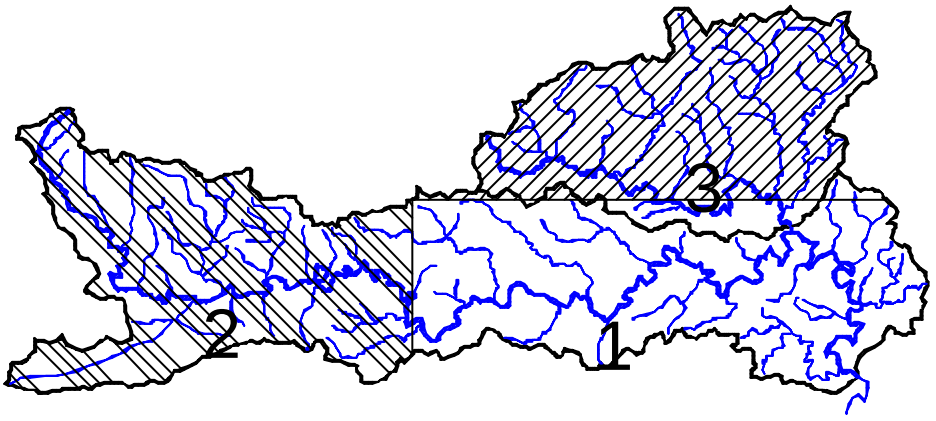


Figura VIII.1.3.6 - Divisão da bacia hidrográfica em três zonas de precipitação

Nos gráficos seguintes a designação Z2 ou Z3 na legenda significa que só ocorreu precipitação na zona 2 ou na zona 3 respectivamente. A intensidade de precipitação é dada pelas curvas IDF de São Brás de Alportel para os respectivos tempos de retorno.

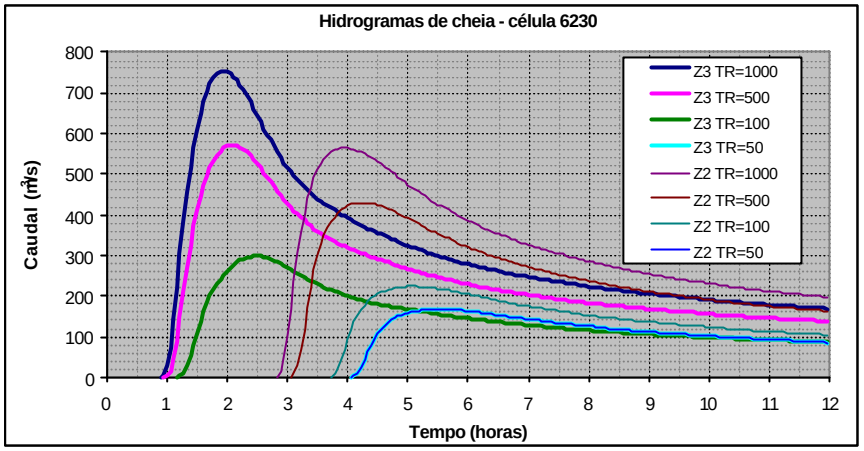


Figura VIII.1.3.7 - Hidrogramas de cheia para períodos de retorno de 50, 100, 500 e 1000 anos precipitação por zona - célula 6230

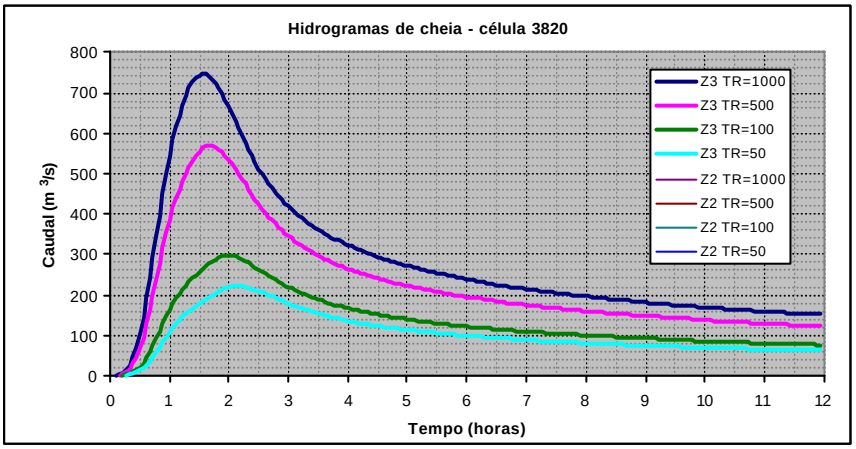


Figura VIII.1.3.8 - Hidrogramas de cheia para períodos de retorno de 50, 100, 500 e 1000 anos precipitação por zona - célula 3820

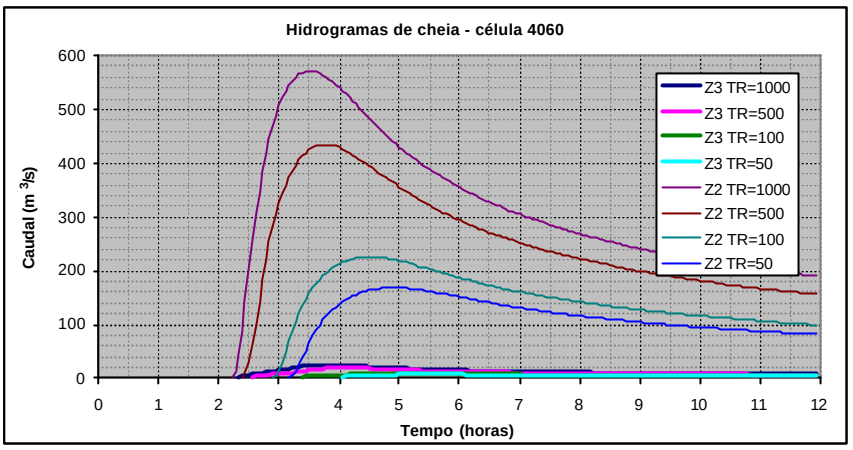


Figura VIII.1.3.9 - Hidrogramas de cheia para períodos de retorno de 50, 100, 500 e 1000 anos precipitação por zona - célula 4060

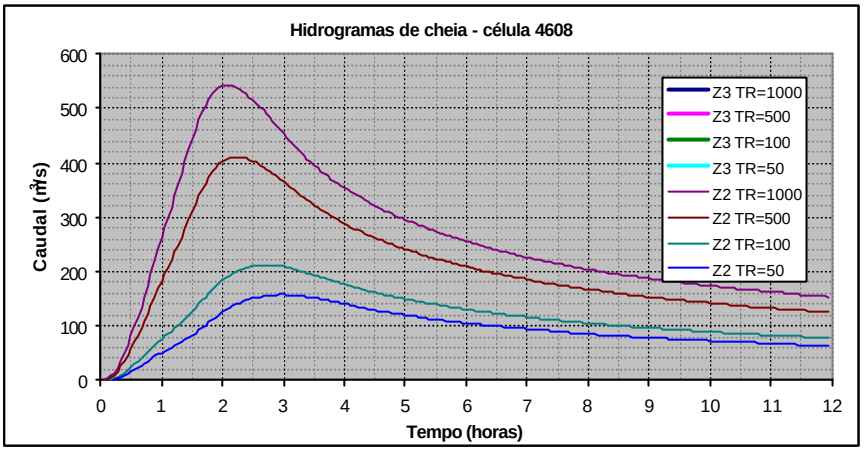


Figura VIII.1.3.10 - Hidrogramas de cheia para períodos de retorno de 50, 100, 500 e 1000 anos precipitação por zona - célula 4608

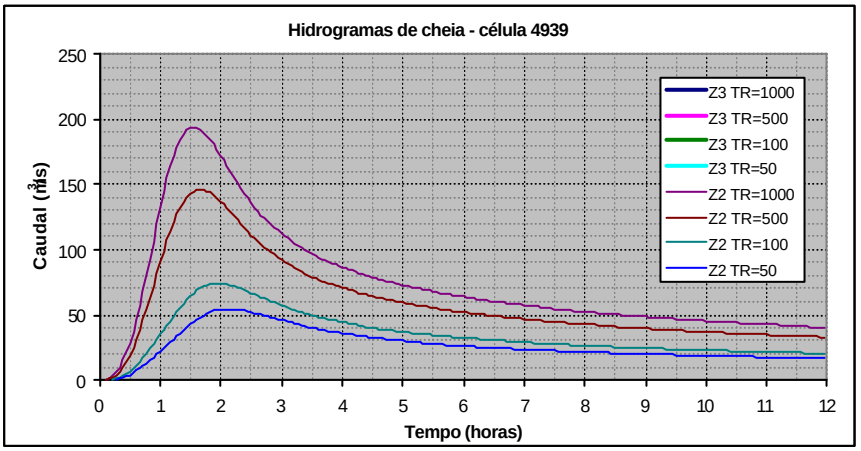


Figura VIII.1.3.11 - Hidrogramas de cheia para períodos de retorno de 50, 100, 500 e 1000 anos precipitação por zona - célula 4939

A zona 3, abrange a sub bacia hidrográfica da Ribeira da Fornalha. A forma em planta desta sub-bacia é mais próxima da de uma circunferência e os declives são mais acentuados, pelo que o tempo de concentração é menor, cerca de 2 horas. Isto faz com que para o mesmo volume escoado, os caudais de pico sejam mais elevados. Desta forma prova-se que chuvas idênticas provocam diferentes respostas na bacia hidrográfica consoante a zona desta em que se fazem sentir.

IX - Conclusões

Ao longo do presente trabalho desenvolveu-se um modelo distribuído determinístico do escoamento superficial de uma bacia hidrográfica. O modelo do escoamento de superfície baseia-se no seguinte:

- a topografia da região em estudo, bem como as propriedades dos solos e respectivos usos são dados na forma de um modelo digital do terreno de quadrícula, em que a superfície do terreno é discretizada em células quadradas regulares. Assume-se que as propriedades do terreno são homogéneas no interior de cada célula, podendo no entanto variar de célula para célula. Verifica-se que tal restrição não constitui problema, pois para o comportamento global da resposta da bacia a um evento pluviométrico, a variabilidade espacial das propriedades do terreno é correctamente representada de acordo com a informação de base disponível;

- a descrição da geomorfologia de uma bacia hidrográfica com base num modelo digital do terreno de quadrícula regular exige considerável quantidade de informação, geralmente esta informação tem o papel como suporte físico, o que torna difícil e demorada a sua conversão para suporte digital e é certamente motivo de dissuasão para a utilização de modelos deste género. Contudo com o desenvolvimento e generalização dos sistemas de informação geográfica, SIG, existe cada vez mais informação disponível em suporte digital em que a sua conversão para o formato requerido para o modelo pode ser automatizada, o que torna atractiva a utilização generalizada deste género de modelos a médio prazo;

- uma área de investigação paralela ao tema de estudo e que tem tido um desenvolvimento surpreendente nos últimos tempos é a detecção remota (Singh, 1996), possibilitando a aquisição de informação via satélite. O formato em que esta informação adquirida via satélite se disponibiliza, após ser tratada, são imagens, mapas de pontos que fácilmente são convertidas nas matrizes de dados necessárias ao modelo. Por isso é de esperar que a médio prazo seja prático modelar bacias hidrográficas utilizando modelos distribuídos;

- com base no modelo digital do relevo, é discretizada a rede hidrográfica. A geração da rede baseia-se no facto de a direcção do escoamento ser a do maior declive. O principal problema que ocorre com o modelo digital do relevo em quadrícula é que se as cotas de cada célula corresponderem exactamente ao ponto que representa o centro de gravidade da bacia

a rede gerada tem poços, ou seja células que não têm saída por representarem erroneamente uma depressão no relevo. Para evitar tal situação a cota de cada célula deverá ser a cota da linha de água mais próxima do centro de gravidade da respectiva célula;

- outro problema que se verificou foi a definição das secções transversais das linhas de água, uma vez que a informação contida no modelo digital do relevo não é suficiente para a sua definição. Por observação da morfologia da região chegou-se à conclusão que a melhor forma de descrever as secções transversais das linhas de água é considerar uma geometria trapezoidal assimétrica. Em que a largura da base é função da ordem do respectivo troço e a inclinação das margens é função das cotas das células vizinhas. Tal consideração poder ter algumas discrepâncias localizadas com a morfologia "*in-situ*", mas considerando a globalidade da bacia e a influência na relação precipitação/escoamento superficial, tal consideração relevou-se ser bastante coerente, uma vez que os valores das rugosidades considerados são coerentes com a bibliografia, Chow 1959, Silva 1996;

- para definir os coeficientes de rugosidade de Manning-Strickler a atribuir aos troços da rede hidrográfica considerou-se, por observação das linhas de água "*in-situ*" uma variação destes coeficientes de montante para jusante proporcional à ordem do respectivo troço. Tal consideração apesar de poder ter algumas discrepâncias com os valores reais, em alguns pontos localizados da bacia hidrográfica, revelou-se acertada, uma vez que os coeficientes de rugosidade atribuídos aos troços de cabeceira, portanto de ordem um e ao troço que representa a secção de controlo são coerentes com a bibliografia, Chow 1959, Silva 1996 e o tempo de concentração determinado mediante o cenário um do capítulo VIII é coerente com o tempo de concentração de uma bacia com estas características, conforme é verificado no respectivo capítulo;

- um dos principais defeitos apontados aos modelos digitais de quadrícula é que os resultados obtidos são influenciados pela dimensão das células. Tal facto realmente ocorre, mas pode ser minimizado pelas considerações feitas no ponto anterior e pela inclusão de um factor de sinuosidade adicional, ver capítulos VI e VIII.

- a aplicação da equação da onda cinemática para a modelação do escoamento superficial em regime variável revelou-se adequada, sendo apenas de referir algumas diferenças verificadas entre as curvas de esvaziamento dos hidrogramas calculado e observado, uma vez que para valores de caudais muito baixos, as celeridades diminuem

consideravelmente, o que faz com que o tempo de esvaziamento da rede hidrográfica seja alto. Tal constatação também é registada por Silva, 1996.

- a principal falha na instrumentação é não existir uma estação udométrica próxima do centro de gravidade da bacia. As estações udométricas, à excepção da estação de São Brás de Alportel estão mais afastadas do centro de gravidade da bacia hidrográfica do que seria desejável. Isto provoca alguma diferença entre a precipitação espacialmente distribuída calculada e a real, o que evidentemente se reflecte nos hidrogramas calculados.

- a aplicação da equação de Green-Ampt para a modelação matemática da infiltração revela alguns problemas quando a aplicação se faz a esta escala. Não obstante do bom comportamento da equação, esta necessita de parâmetros do solo que não são fáceis de obter e que apresentam grande variabilidade espacial, mesmo para o mesmo tipo de solos. Outro problema da aplicação desta equação é que não existe forma explicita de considerar o efeito do uso do solo. Tal consideração terá que ser introduzida nos parâmetros intrínsecos do solo mediante aferição destes.

- a aplicação do método da curva número do Soil Conservation Service para o cálculo da precipitação efectiva revela-se prático. Nos cálculos efectuados observou-se uma excelente aproximação no cálculo do volume de precipitação efectiva, utilizando os valores de *CN* indicados na bibliografia. Contudo a equação de Green-Ampt revelou-se mais eficiente quando se compara a distribuição da precipitação efectiva ao longo do tempo de cálculo.

IX.1 - Restrições

As principais restrições à aplicação do modelo são as seguintes:

- o modelo não considera as perdas por evapotranspiração, o que o torna válido só para simulações com a duração de alguns dias. Contudo, no caso de cheias, tal limitação não é significativa.

- não é considerado o escoamento base, nem o escoamento intermédio. Devido às características da bacia em estudo na qual o escoamento da ribeira á intermitente, este não assume um papel preponderante e no estudo em épocas de cheia os valores do caudal devido ao escoamento base não são significativos quando comparado com os caudais de ponta.

- um modelo distribuído de uma bacia hidrográfica necessita de uma quantidade significativa de dados referentes à topografia do terreno, das propriedades dos solos, dos

usos do solo bem como das propriedades das classes de infiltração. Nem sempre esta informação está disponível fazendo com que na maior parte dos casos seja pouco prático a utilização de modelos desta natureza.

- o caudal de percurso numa linha de água advém do excesso de precipitação P_e, escoamento sub superficial Q_{ss} e escoamento subterrâneo Q_s, como esquematizado na figura IX.1. O modelo apenas considera o escoamento superficial devido ao excesso de precipitação P_e. Ou seja, considera o processo descrito por Horton, 1933.

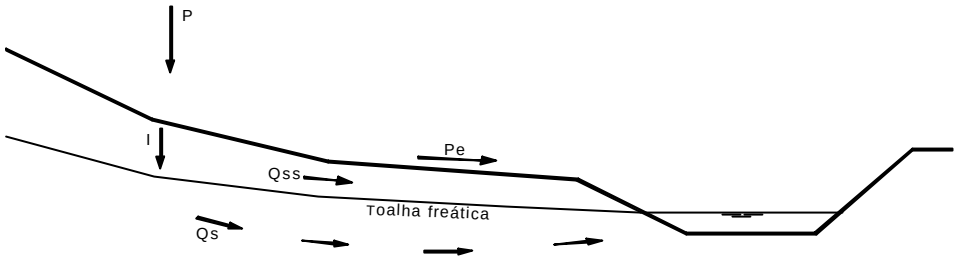


Figura IX.1 - Alimentação de uma linha de água

- em certas situações as inundações podem ser provocadas pela subida da toalha freática até à superfície. Esta situação não é considerada no modelo. Julga-se no entanto que para a bacia em estudo, assim como em muitos outros casos, esta limitação não tem importância, pois devido às condições geomorfológicas da maioria da bacias hidrográficas portuguesas, tal situação não se verifica.

IX.2 - Futuras linhas de desenvolvimento

Futuras linhas de desenvolvimento deste modelo poderão vir a considerar:

- de uma forma integrada o movimento das águas superficiais e subterrâneas e as perdas por evapotranspiração;

- utilizar o modelo desenvolvido, como base para modelos de erosão hídrica, considerando os fenómenos de destacamento, transporte e deposição de sedimentos.

- utilizar o modelo desenvolvido, como base para a modelação do transporte de substâncias dissolvidas, de maior importância no caso da poluição difusa;

- poder considerar a existência de açudes para o controlo de cheias na bacia hidrográfica. Estas obras podem ser consideradas no modelo por células que não transmitem imediatamente o caudal recebido, mas provocam um retardamento e atenuação no hidrograma pela inclusão de um reservatório linear. Na síntese de conhecimentos é feita uma

breve descrição do comportamento e das equações que modelam um reservatório linear. Esta inclusão revela-se extremamente importante se pretendermos efectuar obras para o controlo de cheias na bacia hidrográfica.

Bibliografia

[1] - **Abbott**, M. B. (1992)."*Computational Hydraulics*". International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering, Delft. Danish Hydraulic Institute, Horsholm.

[2] - **Agassi**, M (1996). "*Soil Erosion, Conservation and Rehabilitation*". Marcel Dekker, Inc.

[3] - **Brandão**, C.; **Rodrigues**, R. (1998)"*Precipitações Intensas em Portugal Continental para Periodos de Retorno até 1000 anos* ". Direcção dos Serviços de Recursos Hídricos, Instituto da Água. Lisboa, 1998.

[4] - **Bras**, Rafael L. (1990). "*Hidrology, an introduction to hydrologic science*". Addison-Wesley Series in Civil Engineering.

[5] - **Brown**, A. G.; **Quine**, T. A. "*Fluvial Processes and Environmental Change*". Wiley, 1999.

[6] - **Cárdenas**, Julio Francisco Oliveira (1996)"*Spatially Distribuited Modeling of Storm Runoff and non-Point Source Pollution Using Geographic Information Sistems* ". Dissertação apresentada à Universidade do Texas em Austin.

[7] - **Cardoso**, António Heleno. "*Hidráulica Fluvial*". Fundação Calouste Gulbenkian, 1998

[8] - **Cardoso**, José V. J. de Carvalho (1965). "*Os solos de Portugal, sua classificação, caracterização e génese*". Direcção Geral dos Serviços Agrícolas, Lisboa 1965.

[9] - **Connolly**, D. R.; **Ciesiolka**, C. A. A.; **Silburn** D. M.; **Carrol** C. (1997). "*Distribuited parameter model applied to a range of catchment scales using rainfall simulator data*". Journal of Hydrology, 201 (1997) pag. 311-328.

[10] - **Cornelis** B.; **Vreugdenhil** (1989). "*Computational Hydraulics*". Springer - Verlag.

[11] - **Cunge**, J. A.; **Holly**, F. M.; **Verwey** A. (1980). "*Practical Aspects of Computational River Hydraulics*". Pitman Advanced Publishing Program.

[12] - **Debo**, Thomas N.; **Reese**, Andrew J. "*Municipal Storm Water Management*". Lewis Publisher, 1995.

[13] - **Flanagan**, D. C.; **Nearing**, N. A. (1995). "*USDA - Water Erosion Prediction Project. Hillslope Profile and watershed model documentation*". USDA-ARS, National Soil Erosion Research Laboratory, 1995.

[14] - **Fletcher**, C. A. (1991). "*Computational Techniques for Fluid*" Dynamics". Springer - Verlag

[15] - **Franz**, D.; **Melching**, C. (1997). "*Full Equations model for the Solution of the Full, Dynamic Equations of Motion for One-Dimensional Unsteady Flow in Open Channels and through Control Structures*". U. S. Geological Survey. Water-Resources investigations Report 96-4240.

[16] - **Fread**, D. L.; **Lewis**, J. M. (1998). "*NWS FLDWAV MODEL*". Hydrologic Research Laboratory, Office of hydrology. National Weather Service.

[17] - **Graf**, Walter H.; **Altinakar**, M. S. (1998). "*Fluvial Hydraulics*". Wiley.

[18] - **Hornberg**, G. M.; **Raffensperger**, J. P.; **Wilberg**, P. L. (1998). "*Elements of Physical Hydrology*". The Johns Hopkins University Press.

[19] - **Kopp**, Erwin; **Sobral**, Manuel; **Soares**, Teresa; **Woerner**, Martin. "*Os solos do Algarve e as suas características*". Min. da Agricultura, Pescas e Alimentação - DGHEA. Direcção Regional de Agricultura do Algarve, DRAA. Sociedade Alemã de Cooperação Técnica. Faro 1989.

[20] - **Kothyari**, U. C.; **Tiwari** A. K.; **Singh** R. (1997). "*Estimation of temporal variation of sediment yeld from small catchments through the kinematic method*". Journal of Hydrology, 203 (1997) pag. 39-57.

[21] - **Kutílek**, Miroslav; **Nielsen**, Donald R. "*Soil Hydrology*" (1994). Catena Verlag.

[22] - **Lencastre**, A.; **Franco**, F. M. (1992). "*Lições de Hidrologia*". Universidade Nova de Lisboa. Faculdade de Ciências e Tecnologia.

[23] - **Loureiro**, João Mimoso (1983). "*Monografia hidrológica do Algarve*". Universidade do Algarve. Direcção Geral dos Recursos e Aproveitamentos Hidráulicos

[24] - **Miyazaki**, T. (1993). "*Water Flow in Soils*". Marcel Dekker, Inc.

[25] - **Moussa**, R.; **Bocquillon**, C. (1996). "*Criteria for the choice of flood-routing methods in natural channels*". Journal of Hydrology, 186 (1996) pag. 1-30.

[26] - **Novotny**, Vladimir (1995). "*Nonpoint Polution and urban stormwater management*". Water Quality Management Library - Volume 9. Technomic Publishing Company, Inc., 1995.

[27] - **Parr**, A.; **Zou**, S.; **McEnroe**, B. (Setembro 1998). "*Effects of Infiltration on Agricultural Runoff Contamination*". Journal of Environmental Engineering.

[28] - **Raudkivi**, Arved J. "*Loose Boundary Hydraulics*". A. A. Balkema, 1998.

[29] - **Santos**, Francisco Lúcio (1997). "*Transferencia de água e de solutos no solo*". Publicações Universidade de Évora

[30] - **Silva**, Maria Manuela Portela Correia dos Santos Ramos da (1996). "*Modelo Distribuido de Simulação do Escoamento Superficial*". Dissertação submetida para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Técnica de Lisboa.

[31] - **Singh**, Vijav P; **Fiorentino**, M. (1996). "*Geographical Information Systems in Hydrology*". Kluwer Academic Publishers

[32] - **Smith**, Keith; **Ward**, Roy. "*Floods, Phisical Processes and Human Impacts*". Wiley, 1998.

[33] - **Ven-te-Chow** (1964). "*Handbook of Applied Hydrology*", McGraw-Hill.

[34] - **Ven-te-Chow** (1959). "*Open Channel Hydraulics*". McGraw-Hill.

[35] - **Ven-te-Chow**, **Mays**, Larry ; **Maidment**, David (1988). "*Applied Hydrology*". McGraw-Hill.

[36] - **Wigmosta**, Mark S.; **Burges**, Stephen J. (1997). "*An adaptive modeling and monitoring approach to describe the hydrologic behavior of small catchments*". Journal of Hydrology, 202(1997) pag. 48-77.

[37] - **Yates**, David N. (1997). "*Approaches to Continental Scale Runoff for Integrated Assessment Models*". Journal of Hydrology, 201 (1997) pag. 289-310.

A - Descrição do programa MDBH

A teoria apresentada nos capítulos II a VI, recorre a métodos numéricos que necessitam de um volume apreciável de cálculo. Esta abordagem só é possível de por em prática recorrendo ao calculo computacional. Assim por forma a implementar o modelo, foi escrito no âmbito deste trabalho um programa em Visual Basic, o MDBH (Modelo Distribuído de Bacia Hidrográfica). O programa tem uma interface gráfica como a apresentada na figura A.1.

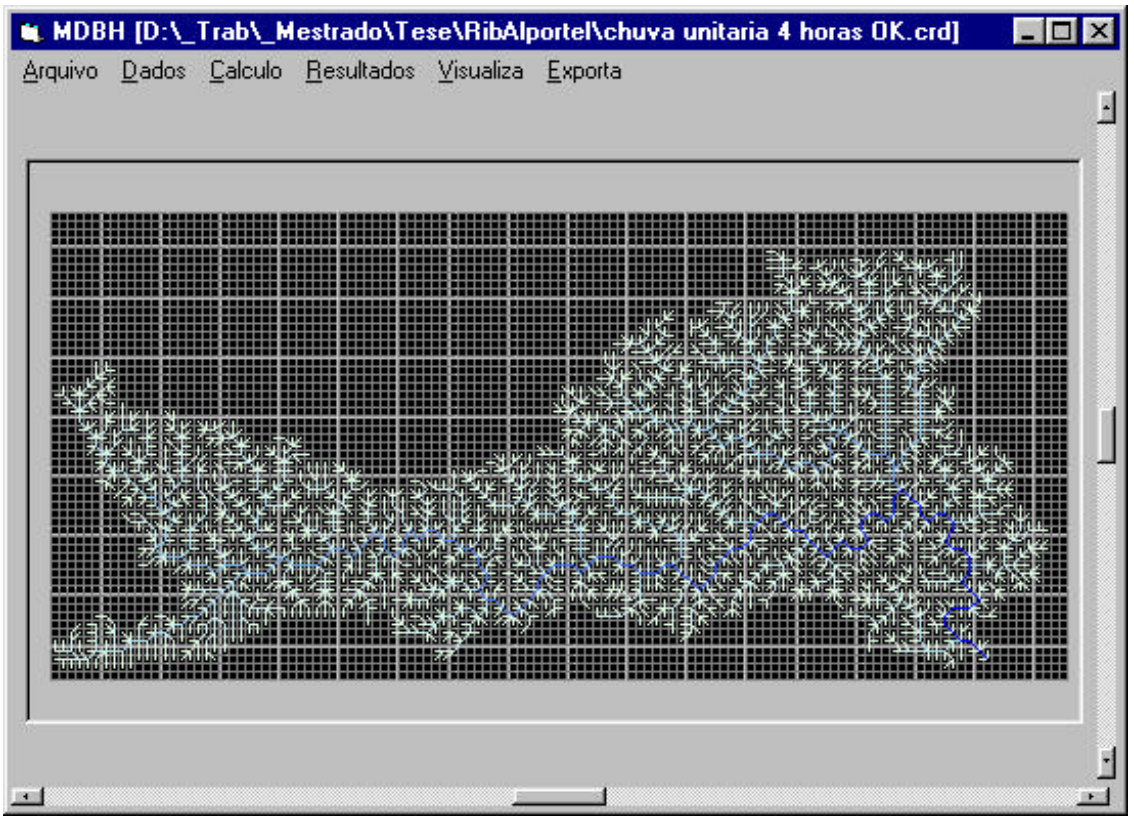
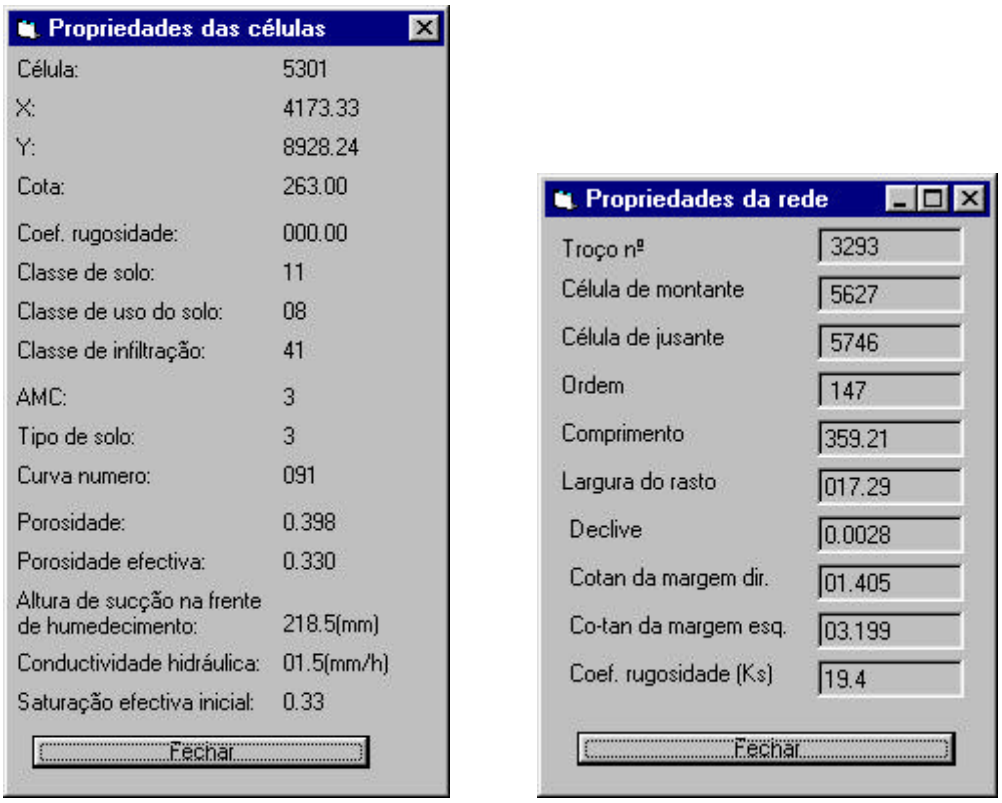

MDBH [D:_Trab_Mestrado\Tese\RibAlportel\chuva unitaria 4 horas OK.crd]
Arquivo Dados Calculo Resultados Visualiza Exporta

Figura A.1 - Janela principal do programa

As propriedades das células que constituem o modelo digital do terreno, bem como as propriedades dos troços da rede hidrográfica podem ser visualizados mediante as janelas apresentadas na figura A.1, bastando para isto passar com o ponteiro do rato sobre a célula ou o troço pretendidos.



a) **b)**

Figura A.2 - Janelas de propriedades a) das células b) da rede

Após ter sido executado a cálculo, é possível visualizar os hidrogramas, em qualquer local da bacia hidrográfica, bastando para isso, um duplo *click* no botão esquerdo do rato, com o ponteiro sobre a célula pretendida.

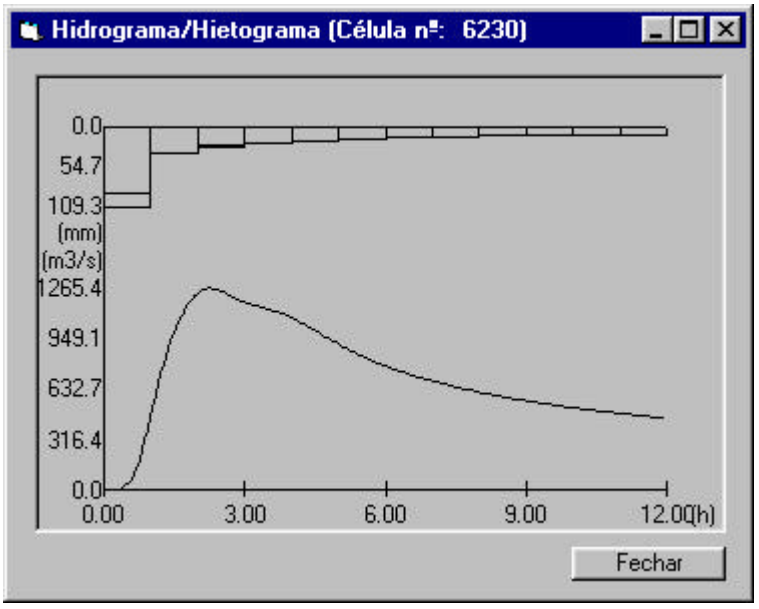


Figura A.3 - Hietogramas de precipitação/precipitação efectiva e hidrograma

A.1 - Estrutura dos ficheiros de dados

Os dados são fornecidos ao programa em ficheiros de texto em que a virgula é o separados de campo, sendo necessário ter os seguintes ficheiros para o funcionamento do programa:

PROJECTO.PRJ

informação sobre o projecto, variáveis globais e localização dos restantes ficheiros;

MDT.DAT

modelo digital do terreno;

QINI.DAT

imposição do escoamento de base;

KMANNING.DAT

coeficientes de rugosidade de Manning-Strickler (K_s);

CLASSESDESOLO.DAT

identificação e distribuição espacial das classes taxonómicas do solo;

CLASSESDEUSODOSOLO.DAT

identificação e distribuição espacial das classes de uso do solo;

CLASSESDEINFILT.DAD

identificação e distribuição espacial das classes de infiltração;

PROPSOLOSGA.DAT

propriedades das classes de infiltração para a equação de Green-Ampt;

PROPSOLOSSCS.DAT

propriedades das classes de infiltração para o método da curva (CN) do Soil Conservation Service;

CHUVA.DAT

séries de dados da precipitação registados nas estações meteorológicas localização das respectivas estações;

RESESC.RES

ficheiro onde são guardados os resultados do cálculo do escoamento superficial obtidos;

RESCHUVA.RES

ficheiro onde são guardados os resultados da distribuição espacial da chuva e do cálculo da chuva efectiva.

A.1.1 - Ficheiro PROJECTO.PRJ

O ficheiro PROJECTO.PRJ tem 22 linhas e possui a seguinte estrutura:

```
DESCRIÇÃO
NX
NY
DX
DY
NT
DT
BSECCONTROL
KSCAB
KSFOZ
COEFSINADIC
FICH_MDT.DAT
FICH_QINI.DAT
FICH_KMANNING.DAT
FICH_CLASSESDESOLO.DAT
FICH_CLASSESDEUSODOSOLO.DAT
FICH_CLASSESDEINFILT.DAT
FICH_PROPSOLOSGA.DAT
FICH_PROPSOLOSSCS.DAT
FICH_CHUVA.DAT
FICH_RESESC.DAT
FICH_RESCHUVA.DAT
```

Descrição das variáveis contidas neste ficheiro.

DESCRIÇÃO	nome do projecto;
NX	número de células segundo a horizontal, número de colunas do modelo digital do terreno;

NY	número de células segundo a vertical, número de linhas do modelo digital do terreno;
DX	dimensão da célula, medida segundo a horizontal;
DY	dimensão da célula, medida segundo a vertical;
NT	número de intervalos de tempo considerados no cálculo;
DT	tamanho do intervalo de tempo considerado na discretização temporal;
BSECCONTROL	largura do rasto do leito da ribeira na secção final;
KSCAB	coeficiente de rugosidade atribuído aos troços de ordem 1;
KSFOZ	coeficiente de rugosidade atribuído ao leito na secção de controlo;
COEFSINADIC	coeficiente de sinuosidade adicional;
FICH_MDT.DAT	nome e caminho completo do ficheiro MDT.DAT
FICH_QINI.DAT	nome e caminho completo do ficheiro QINI.DAT
FICH_KMANNING.DAT	nome e caminho completo do ficheiro KMANNING.DAT
FICH_CLASSESDESOLO.DAT	nome e caminho completo do ficheiro CLASSESDESOLO.DAT
FICH_CLASSESDEUSODOSOLO.DAT	nome e caminho completo do ficheiro CLASSESDEUSODOSOLO.DAT
FICH_CLASSESDEINFILT.DAT	nome e caminho completo do ficheiro CLASSESDEINFILT.DAT

`FICH_PROPSOLOSGA.DAT`	nome e caminho completo do ficheiro PROPSOLOSGA.DAT
`FICH_PROPSOLOSSCS.DAT`	nome e caminho completo do ficheiro PROPSOLOSSCS.DAT
`FICH_CHUVA.DAT`	nome e caminho completo do ficheiro CHUVA.DAT
`FICH_RESESC.DAT`	nome e caminho completo do ficheiro RESESC.DAT
`FICH_RESCHUVA.DAT`	nome e caminho completo do ficheiro RESCHUVA.DAT

A.1.2 - Ficheiro MDT.DAT

O ficheiro MDT.DAT contém o modelo digital do terreno. É um ficheiro de texto com as cotas de todas as células. Basicamente é uma matriz com *NY* linhas por *NX* colunas. O separados de campo é a virgula (,). Nas células que ficam fora da bacia hidrográfica é atribuído o código -1 em vez da respectiva cota.

$$\begin{matrix} Z_{1,1} & Z_{1,2} & \ldots & Z_{1,NX} \\ Z_{2,1} & Z_{2,2} & \ldots & Z_{2,NX} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ Z_{NY,1} & Z_{NY,2} & \ldots & Z_{NY,NX} \end{matrix}$$

A.1.3 - Ficheiro QINI.DAT

O ficheiro QINI.DAT contém os caudais que se encontram a circular na bacia hidrográfica no instante em que se inicia a simulação. É um ficheiro de texto com *NY* linhas e cada linha com *NX* valores separados por virgulas. Nas células que ficam fora da bacia hidrográfica é atribuído o código -1 em vez do respectivo valor. Este ficheiro não é obrigatório, se não for aberto, todos os caudais no instante inicial são considerados nulos. O ficheiro possui a seguinte estrutura:

$$\begin{matrix} Q_{1,1} & Q_{1,2} & \ldots & Q_{1,NX} \\ Q_{2,1} & Q_{2,2} & \ldots & Q_{2,NX} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ Q_{NY,1} & Q_{NY,2} & \ldots & Q_{NY,NX} \end{matrix}$$

A.1.4 - Ficheiro KMANNING.DAT

O ficheiro KMANNING.DAT contém os coeficientes de rugosidade de Manning-Strickler para todas as células. É um ficheiro de texto com *NY* linhas e cada linha com *NX* valores separados por virgulas. Nas células que ficam fora da bacia hidrográfica é atribuído o código -1 em vez do respectivo valor. Este ficheiro não é obrigatório, se não for aberto, é considerada a distribuição de rugosidades apresentada no capítulo VI. O ficheiro possui a estrutura seguinte:

$$\begin{matrix} K_{1,1} & K_{1,2} & \ldots & K_{1,NX} \\ K_{2,1} & K_{2,2} & \ldots & K_{2,NX} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ K_{NY,1} & K_{NY,2} & \ldots & K_{NY,NX} \end{matrix}$$

A.1.5 - Ficheiro CLASSESDESOLO.DAT

O ficheiro CLASSESDESOLO.DAT contém os identificadores das classes taxonómicas dos solos de todas as células. É um ficheiro de texto com *NY* linhas e cada linha com *NX* valores separados por virgulas. Nas células que ficam fora da bacia hidrográfica é atribuído o código -1 em vez do respectivo valor. Este ficheiro possui a estrutura seguinte:

$$\begin{matrix} CS_{1,1} & CS_{1,2} & \ldots & CS_{1,NX} \\ CS_{2,1} & CS_{2,2} & \ldots & CS_{2,NX} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ CS_{NY,1} & CS_{NY,2} & \ldots & CS_{NY,NX} \end{matrix}$$

A.1.6 - Ficheiro CLASSESDEUSODOSOLO.DAT

O ficheiro CLASSESDEUSODOSOLO.DAT contém os identificadores das classes de uso do solo de todas as células. É um ficheiro de texto com *NY* linhas e cada linha com *NX* valores separados por virgulas. Nas células que ficam fora da bacia hidrográfica é atribuído o código -1 em vez do respectivo valor. Este ficheiro possui a estrutura seguinte:

$$\begin{matrix} CUS_{1,1} & CUS_{1,2} & ... & CUS_{1,NX} \\ CUS_{2,1} & CUS_{2,2} & ... & CUS_{2,NX} \\ ... & ... & ... & ... \\ CUS_{NY,1} & CUS_{NY,2} & ... & CUS_{NY,NX} \end{matrix}$$

A.1.7 - Ficheiro CLASSESDEINFILTRAÇÃO.DAT

O ficheiro CLASSESDEINFILTRAÇÃO.DAT contém os identificadores das classes de infiltração de todas as células. É um ficheiro de texto com *NY* linhas e cada linha com *NX* valores separados por virgulas. Este ficheiro é gerado pelo programa, resultando da combinação dos ficheiros CLASSESDESOLOS.DAT e CLASSESDEUSODOSOLO.DAT e possui a estrutura seguinte:

$$\begin{matrix} CINF_{1,1} & CINF_{1,2} & ... & CINF_{1,NX} \\ CINF_{2,1} & CINF_{2,2} & ... & CINF_{2,NX} \\ ... & ... & ... & ... \\ CINF_{NY,1} & CINF_{NY,2} & ... & CINF_{NY,NX} \end{matrix}$$

A.1.8 - Ficheiro PROPSOLOSGA.DAT

Este ficheiro contém as propriedades atribuídas a cada classe de infiltração necessárias ao cálculo da precipitação efectiva pela equação de Green-Ampt e possui a seguinte estrutura:

```
NCI
 01, P, PE, PSI, K, SE
 02, P, PE, PSI, K, SE
 03, P, PE, PSI, K, SE
  …, …,  …,  … , …,  …
NCI, P, PE, PSI, K, SE
```

sendo:

NCI	número de classes de infiltração;
P	porosidade;
PE	porosidade efectiva;
PSI	altura de sucção na frente de humedecimento;

K	conductividade hidráulica;
SE	saturação efectiva inicial.

A.1.9 - Ficheiro PROPSOLOSSCS.DAT

Este ficheiro contém as propriedades atribuídas a cada classe de infiltração necessárias ao cálculo da precipitação efectiva pelo método da curva número do Soil Conservation Service e possui a seguinte estrutura:

```
NCI
 01, SOLOTIPO, AMC, CN
 02, SOLOTIPO, AMC, CN
 03, SOLOTIPO, AMC, CN
  …,     …   ,  … ,  …
NCI, SOLOTIPO, AMC, CN
```

sendo:

NCI	número de classes de infiltração;
SOLOTIPO	grupo hidrológico do solo segundo o Soil Conservation Service;
AMC	condição antecedente de humidade '*Antecedent Moisture Condition*';
CN	curva número;

A.1.10 - Ficheiro CHUVA.DAT

O ficheiro CHUVA.DAT contém os registos de precipitação horária e a localização das respectivas estações meteorológicas. A sua estrutura é a seguinte:

```
NESTAC
DTCHUVA
NCHUVA
NOME_ESTAC_1
```

```
X1, Y1
CH_1_E1
CH_2_E1
…
…
CH_NCHUVA_E1
NOME_ESTAC_2
X2, Y2
CH_1_E2
CH_2_E2
…
…
…
CH_NCHUVA_E2
NOME_ESTAC_NESTAC
XNESTAC, YNESTAC
CH_1_NESTAC
CH_2_NESTAC
…
…
CH_NCHUVA_NESTAC
```

sendo:

NESTAC	número de estações udométricas;
DTCHUVA	tempo unitário de chuva TUC;
NCHUVA	número de intervalos de tempo com a duração DTCUVA considerados;
NOME_ESTAC	nome da estação udométrica;
X	coordenada x da estação udométrica;
Y	coordenada y da estação udométrica;
CH	precipitação registada no respectivo intervalo de tempo *DTCHUVA*.

A.2 - Comandos

O programa opera através de menus, cuja estrutura se passa a descrever.

Arquivo

Abre projecto

abre o ficheiro de projecto;

Abre calculo da rede

abre o ficheiro de cálculo da rede com a extensão .crd. Este comando restitui uma sessão de trabalho;

Grava calculo da rede

grava a rede, mais os resultados do cálculo em memória no instante em que o comando é dado;

Abre rede

abre um ficheiro com a extensão .rde que contém a definição da rede hidrográfica. Quando se abre este ficheiro não é necessário gerar de novo a rede hidrográfica;

Grava rede

após gerar a rede, operação que pode levar alguns minutos é possível gravar a definição da rede num ficheiro com a extensão .rde, isto faz com que não seja necessário gerar a rede sempre que se pretende efectuar um novo cálculo;

Terminar

encerra o programa;

Dados

Modelo digital do terreno

abre o ficheiro que contém o modelo digital do terreno e guarda em memória os seus valores;

Caudais iniciais

este comando não é obrigatório, só é necessário se existir escoamento no instante inicial;

Coef. Rugosidade

este comando não é obrigatório, no ficheiro PROJECTO.DAT, já existe informação sobre os coeficientes de rugosidade. Só é necessário se for conveniente utilizar uma distribuição diferente da

apresentada para os coeficientes de rugosidade de Manning-Strickler;

Classes taxonómicas

abre o ficheiro que contém a distribuição espacial das classes taxonómicas do solo da bacia em estudo;

Classes de uso do solo

abre o ficheiro que contém a distribuição espacial das classes de uso do solo da bacia em estudo;

Classes de infiltração

abre o ficheiro que contém a distribuição espacial das classes de infiltração da bacia em estudo;

Propriedades das classes de infiltração (Green-Ampt)

abre o ficheiro que contém as propriedade das classes de infiltração necessárias à modelação da infiltração pela equação de Green-Ampt;

Propriedades das classes de infiltração (SCS)

abre o ficheiro que contém as propriedade das classes de infiltração necessárias ao cálculo da precipitação efectiva pelo método da Curva Número do Soil Conservation Service;

Chuva

abre o ficheiro que contém os hietogramas fornecidos e localização das estações das udométricas envolvidas no cálculo da relação precipitação/escoamento superficial;

Todos

abre todos os ficheiros de dados descritos anteriormente;

Calculo

Gera classes de infiltração

tendo em memória a distribuição espacial das classes taxonómicas dos solos e das classes de uso do solo, pela intersecção destas são geradas e guardadas em ficheiro as classes de infiltração;

Gera rede hidrográfica

com base no modelo digital do relevo gera a rede hidrográfica;

Calcula distribuição de chuvas

pela localização das estações udométricas e respectivos hietogramas calcula a distribuição espacial da precipitação sobre a bacia hidrográfica correspondente a um determinado evento meteorológico;

Calcula precipitação efectiva (Green-Ampt)

calcula os hietogramas de precipitação efectiva pela equação de Green-Ampt;

Calcula precipitação efectiva (CN)

calcula os hietogramas de precipitação efectiva pelo método da curva número;

Calcula escoamento na rede hidrográfica (Método linear)

calcula o escoamento na rede hidrográfica, pela resolução da equação da onda cinemática pelo método linear. O método utilizado para o cálculo da precipitação efectiva é aquele cujas propriedades foram lidas por último;

Calcula escoamento na rede hidrográfica (Método não linear)

calcula o escoamento na rede hidrográfica, pela resolução da equação da onda cinemática pelo método não linear. O método utilizado para o cálculo da precipitação efectiva é aquele cujas propriedades foram lidas por último;

Calcula escoamento na rede hidrográfica (ML -> MNL)

como para efectuar o calculo pelo método não linear é necessário efectua-lo primeiro pelo método linear, este comando efectua os dois cálculos em sequência, não parando após o primeiro;

Calculo de volumes

Calcula volume de precipitação total (P)

calcula o volume precipitado total sobre a bacia hidrográfica durante o tempo de cálculo;

Calcula volume de precipitação efectiva total (Pe-GA)

calcula o volume de precipitação efectiva gerado sobre toda a bacia hidrográfica durante o tempo de cálculo, calculado com base na equação de Green-Ampt;

Calcula volume de precipitação efectiva total (Pe-SCS)

calcula o volume de precipitação efectiva gerado sobre toda a bacia hidrográfica durante o tempo de cálculo, calculado com base no método da Curva Número;

Calcula volume escoado total

calcula o volume escoado numa determinada secção durante o tempo de calculo;

Calculo de áreas

grava num ficheiro o valor das áreas de cada uma das classes taxonómicas do solo, de uso do solo e de infiltração;

Calcula inclinação média das vertentes

com base no modelo digital do relevo calcula a inclinação média das vertentes;

Hipsometria

grava num ficheiro a percentagem de área da bacia em função da altitude;

Perfil longitudinal

grava num ficheiro as cota em função da distância a uma célula qualquer definida pelo utilizador, medida segundo a direcção do maior declive;

Resultados

Rede hidrográfica

grava num ficheiro toda a estrutura da rede hidrográfica discretizada;

Precipitação

grava num ficheiro os hietogramas de precipitação total e efectiva para todas as células e para todos os instantes;

Escoamento

grava num ficheiro os valores dos caudais, celeridades e alturas hidrométricas calculados em todos os nós da rede hidrográfica em todos os instantes;

Escoamento no perfil

grava num ficheiro os valores dos caudais, celeridades e alturas hidrométricas calculados em todos os nós do perfil longitudinal de uma linha de água com origem definida pelo utilizador e num determinado instante;

Hietograma/Hidrograma

permite visualizar graficamente os hietogramas de precipitação total e de precipitação efectiva que se verificam numa determinada célula, bem como o hidrograma dos caudais que passam pela respectiva célula. Este comando por um duplo *click* no botão esquerdo do rato, com o ponteiro posicionado sobre a célula pretendida;

Áreas de contribuição

gera um ficheiro "*script*" com a extensão scr com a imagem da bacia hidrográfica indicando por cores quais as células que estão a contribuir para o escoamento na secção de controlo, num determinado instante definido pelo utilizador. Este ficheiro é reconhecido pelo programa de desenho *AutoCAD* da *Autodesk*.;

Res. Esc. Cel. nº

grava num ficheiro os caudais, celeridades, alturas hidrométricas, precipitação e precipitação efectiva numa determinada célula em todos os instantes;

Visualiza

Rede hidrográfica

actualiza no monitor a representação gráfica da rede hidrográfica;

Propriedades das células

abre a janela que permite visualizar as propriedades das células;

Propriedades da rede

abre a janela que permite visualizar as propriedades dos troços da rede hidrográfica;

Zoom +

amplia a representação gráfica da bacia hidrográfica no monitor;

Zoom -

diminui a representação gráfica da bacia hidrográfica no monitor;

Exporta

Modelo digital do relevo -> SURFER

cria um ficheiro contendo o modelo digital do relevo com um formato reconhecido pelo programa *Surfer da Golden Software Inc.* ;

Rede hidrográfica -> ACAD

cria um ficheiro "*script*" com a estrutura da rede hidrográfica. Este ficheiro é reconhecido pelo programa de desenho *AutoCAD* da *Autodesk*;

Modelo digital do terreno (pontos 3D) -> ACAD

cria um ficheiro "*script*" com os pontos em três dimensões que definem o modelo digital do relevo. Este ficheiro é reconhecido pelo programa de desenho *AutoCAD* da *Autodesk*;

Modelo digital do terreno (barras 3D) -> ACAD

cria um ficheiro "*script*" com paralelepípedos cuja base é igual à dimensão da célula e a altura é a cota da célula. Este ficheiro é reconhecido pelo programa de desenho *AutoCAD* da *Autodesk*;

Categorias taxonómicas -> ACAD

cria um ficheiro "*script*" com superfícies planas quadradas adjacentes, dispostas como na distribuição espacial das células, com a mesma

dimensão destas e cujas cores são atribuídas pelas classes taxonómicas do solo. Este ficheiro é reconhecido pelo programa de desenho *AutoCAD* da *Autodesk*;

Usos do solo -> ACAD

cria um ficheiro "*script*" com superfícies planas quadradas adjacentes, dispostas como na distribuição espacial das células, com a mesma dimensão destas e cujas cores são atribuídas pelas classes de uso do solo. Este ficheiro é reconhecido pelo programa de desenho *AutoCAD* da *Autodesk*;

Classes de infiltração -> ACAD

cria um ficheiro "*script*" com superfícies planas quadradas adjacentes, dispostas como na distribuição espacial das células, com a mesma dimensão destas e cujas cores são atribuídas pelas classes de infiltração. Este ficheiro é reconhecido pelo programa de desenho *AutoCAD* da *Autodesk*;

B - Código Fonte do Programa MDBH

A estrutura do programa assenta em dois módulos, o módulo Escoamento contém e trata os dados relativos ao modelo digital do terreno, assim como as rotinas que geram a rede e implementam a resolução numérica da equação da onda onda cinemática. O módulo Infiltração lida com os dados das classes taxonómicas do solo, das classes de uso do solo e das classes de infiltração, bem como da precipitação. Contém as rotinas para o cálculo da distribuição espacial da precipitação, calculo da precipitação efectiva e dos caudais de percurso que alimentam a rede.

A.1 - Módulo Escoamento

```
Attribute VB_Name = "mdlEscoamento"
Option Base 1
Option Explicit

Dim comentario As String


'Dados do modelo digital do terreno
    Public x0 As Single
    Public y0 As Single
    Public Nx As Integer       'numero de linhas
    Public Ny As Integer       'numero de colunas
    Public Dx As Single        'Dx = Dy   dimensão da celula
    Public Dy As Single
    Public Dt As Single        'incremento de tempo
    Public Nt As Single        'numero de incrementos de tempo

    Private DEM() As Single     'digital elevation model
    Private Qini() As Single    'dados do escoamento em cada célula no inicio, t=0
    Private Krug() As Single    'coef's. de rugosidade
    Private KsFoz As Single
    Private KsCabeceira As Single

    'variável que define qual o método para o cálculo da
    'precipitação efectiva
    Public mcPe As Integer          '1 - Green Ampt
                                    '2 - SCS (CN)

'Dados dos segmentos de canal

    Private Nc As Integer           'nunero de troços de canal
    Private no1() As Integer        'nó 1 do troço ic
    Private no2() As Integer        'nó 2 do troço ic
    Private Ordem() As Integer      'ordem do troço ic
    Private sL() As Single          'comprimento do troço ic
    Private sS0() As Single         'declive do troço ic
    Private sM1() As Single         'declive da margem esquerda
    Private sM2() As Single         'declive da margem direita
    Private MaxB As Single          'largura da base do canal na secção de controlo
    Private fSinAdic As Single      'factor de sinuosidade adicional
    Private sB() As Single          'largura da base do canal

    Private Q1() As Single          'caudal na extremidade Montante
    Private Q2() As Single          'caudal na extremidade Jusante
    Private H2() As Single          'altura da lamina de água na extremidade de jusante
    Private cK() As Single          'celeridade da onda cinemática

'strings com a localização dos ficheiros
Private fileMDT As String                   'modelo digital do terreno
Private fileQini As String                  'caudais iniciais
```

```
        Private fileKManning As String              'coef. de rugosidade
        Private fileResEsc As String                'resultados


        'strings com a localização dos ficheiros de dados
        Public fileClassesDeSolo As String          'classes de solo
        Public fileClassesDeUsoDoSolo As String
        Public fileClassesDeInfilt As String        'classes de infiltração, combinação das 2 anteriores
        Public filePropSolosGA As String            'propriedades das classes de solo
        Public filePropSolosSCS As String
        Public fileChuva As String                  'dados referentas à chuva e estações meteorologicas
        Public fileResChuva As String               'dados referentes à infiltração



        Public Sub CalculaArea_CMax_CMin(dcota As Single, file As String)

        Dim iy As Integer
        Dim ix As Integer
        Dim Area As Single

        Dim cmin As Single
        Dim cmax As Single

        Open file For Output As #1

            Print #1, "    cmax   "; "    cmin    "; "   area    "
            For cmin = 0 To 2500 Step dcota
                cmax = cmin + dcota
                Area = 0
                For iy = 1 To Ny
                    For ix = 1 To Nx
                        If DEM(ix, iy) < cmax And DEM(ix, iy) >= cmin And DEM(ix, iy) <> -1 Then
                            Area = Area + Dx * Dy
                        End If
                    Next ix
                Next iy
                'If area = 0 Then Exit For
                   Print #1, Format(cmax, "000.000"); "    "; Format(cmin, "000.000"); "      "; Format(Area,
"000.000")
            Next cmin

        Close #1

        End Sub


        Public Function CalculaAreaDaBacia() As Single
        Dim iy As Integer
        Dim ix As Integer
        Dim Area As Single

            For iy = 1 To Ny
                For ix = 1 To Nx
                    If DEM(ix, iy) <> -1 Then
                        Area = Area + Dx * Dy
                    End If
                Next ix
            Next iy

            CalculaAreaDaBacia = Area

        End Function


        Public Sub CalculaAreasDeContribuicao(t As Single)
        'calcula as áreas da bacia hidrográfica que
        'contribuem estão a contribuir para o escoamento
        'num dado instante t

            Dim Dtot As Single
            Dim xTot As Single
            Dim ttot As Single

            Dim ic As Integer
```

```
    Dim iic As Integer
    Dim kc As Integer
    Dim j As Integer

    Dim AreaCont() As Boolean
    ReDim AreaCont(Nx * Ny) As Boolean




    Dim icel As Integer
    Dim ix As Integer
    Dim iy As Integer

    Dim cs As Integer

    Dim X As Single
    Dim Y As Single

    Dim p1x As Single
    Dim p1y As Single

    Dim p2x As Single
    Dim p2y As Single

    Dim p3x As Single
    Dim p3y As Single

    Dim p4x As Single
    Dim p4y As Single

    Dim icsolo As Integer

    Dim cck As Single

    For ic = 1 To Nc

        'calculo do tempo que a água de cada célula leva a chegar
        'à secção de controlo
        j = t / Dt
        iic = ic
        ttot = 0
            For kc = iic To Nc
                If no1(kc) = no2(iic) Then
                    cck = cK(kc, j)

                    If cck <> 0 Then
                        ttot = ttot + sL(ic) / cck
                        If ttot > t Then GoTo lb_ExcessoDeTempo
                    Else
                        ttot = ttot + 9999999
                        GoTo lb_ExcessoDeTempo
                    End If

                    iic = kc
                End If
            Next kc
lb_ExcessoDeTempo:
            If t >= ttot Then
                AreaCont(no1(ic)) = True
            Else
                AreaCont(no1(ic)) = False
            End If

    Next ic




Open "c:\AreaContribuicao.scr" For Output As #1
```

```
            icel = 0
            For iy = 1 To Ny
                For ix = 1 To Nx
                    icel = icel + 1


                    X = ix * Dx
                    Y = -iy * Dy

                    p1x = X - Dx / 2
                    p1y = Y - Dy / 2

                    p2x = X - Dx / 2
                    p2y = Y + Dy / 2

                    p3x = X + Dx / 2
                    p3y = Y - Dx / 2

                    p4x = X + Dx / 2
                    p4y = Y + Dx / 2


                    If DEM(ix, iy) <> -1 Then
                        If AreaCont(icel) = True Then
                            cs = 5
                        Else
                            cs = 2
                        End If
                    Else
                        cs = 255
                    End If


                    Print #1, "COLOR "; CStr(cs)
                         Print #1, "SOLID "; CStr(p1x); ","; CStr(p1y); " "; CStr(p2x); ","; CStr(p2y); " ";
CStr(p3x); ","; CStr(p3y); " "; CStr(p4x); ","; CStr(p4y); " "

                Next ix
            Next iy


        Close #1



        End Sub


        Public Function CalculaInclinacaoMediaDasVertentes()
        Dim ic As Single
        Dim slope As Single

            For ic = 1 To Nc
                slope = slope + sS0(ic)
            Next ic

            CalculaInclinacaoMediaDasVertentes = slope / Nc

        End Function


        Private Sub CalculaSecT()
        'cálcula as variáveis que definem a secção transversal
        '  m1
        '  m2
        '  b



        Dim C1 As Integer
        Dim L1 As Integer

        Dim C2 As Integer
        Dim L2 As Integer

        Dim n1 As Integer
```

```
Dim n2 As Integer

Dim ic As Integer

Dim p1 As Single
Dim p2 As Single
Dim p3 As Single
Dim p4 As Single
Dim p5 As Single
Dim p6 As Single
Dim p7 As Single
Dim p8 As Single
Dim p9 As Single

Dim m1 As Single
Dim m2 As Single
Dim m As Single

Dim coefB As Single
Dim maxordem As Integer

    'ordem do ultimo troço
    maxordem = Ordem(Nc)
    'coeficiente de proporcionalidade entre a ordem do troço
    'e a largura do rasto do canal
    coefB = MaxB / maxordem

'****************************************
'suposição de os troços terem margens a 1/1
'    For ic = 1 To Nc
'        sM1(ic) = 1
'        sM2(ic) = 1
'        sB(ic) = coefB * Ordem(ic)
'    Next ic
'    Exit Sub
'****************************************


    For ic = 1 To Nc

        'calcula a largura do rasto do canal
        sB(ic) = coefB * Ordem(ic)

        'determina qual a direcção do troço ic
        n1 = no1(ic)        'nó 1 do troço ic
        n2 = no2(ic)        'nó 2 do troço ic

        C1 = ixNNo(n1)      'coluna
        L1 = iyNNo(n1)      'linha

        C2 = ixNNo(n2)      'coluna
        L2 = iyNNo(n2)      'linha

        If C1 = 1 Or C1 = Nx Or L1 = 1 Or L1 = Ny Or C2 = 1 Or C2 = Nx Or L2 = 1 Or L2 = Ny Then
            sM1(ic) = -1
            sM2(ic) = -1
        ElseIf C2 = C1 And L2 = L1 + 1 Then            'S
            p1 = DEM(C1 - 1, L1)
            p2 = DEM(C1, L1)
            p3 = DEM(C1 + 1, L1)
            p7 = DEM(C1 - 1, L2)
            p8 = DEM(C1, L2)
            p9 = DEM(C1 + 1, L2)
            p4 = (p1 + p7) / 2
            p5 = (p2 + p8) / 2
            p6 = (p3 + p9) / 2

            If p3 = -1 Or p9 = -1 Or p6 = p5 Then
                sM1(ic) = -1
            Else
                sM1(ic) = (Dx - sB(ic) / 2) / (p6 - p5)
            End If
            If p1 = -1 Or p7 = -1 Or p4 = p5 Then
                sM2(ic) = -1
            Else
                sM2(ic) = (Dx - sB(ic) / 2) / (p4 - p5)
```

```
    End If
    If sM1(ic) < 0 Then sM1(ic) = -1
    If sM2(ic) < 0 Then sM2(ic) = -1
    If sM1(ic) = -1 And sM2(ic) <> -1 Then sM1(ic) = sM2(ic)
    If sM1(ic) <> -1 And sM2(ic) = -1 Then sM2(ic) = sM1(ic)

ElseIf C2 = C1 + 1 And L2 = L1 + 1 Then     'SE
    p1 = DEM(C1, L1)
    p2 = DEM(C2, L1)
    p3 = DEM(C1, L2)
    p4 = DEM(C2, L2)
    p5 = (p1 + p4) / 2

    If p2 = -1 Or p2 = p5 Then
        sM1(ic) = -1
    Else
        sM1(ic) = (0.5 * Sqr(Dx ^ 2 + Dy ^ 2) - sB(ic) / 2) / (p2 - p5)
    End If
    If p3 = -1 Or p3 = p5 Then
        sM2(ic) = -1
    Else
        sM2(ic) = (0.5 * Sqr(Dx ^ 2 + Dy ^ 2) - sB(ic) / 2) / (p3 - p5)
    End If
    If sM1(ic) < 0 Then sM1(ic) = -1
    If sM2(ic) < 0 Then sM2(ic) = -1
    If sM1(ic) = -1 And sM2(ic) <> -1 Then sM1(ic) = sM2(ic)
    If sM1(ic) <> -1 And sM2(ic) = -1 Then sM2(ic) = sM1(ic)


ElseIf C2 = C1 + 1 And L2 = L1 Then         'E
    p1 = DEM(C1, L1 + 1)
    p2 = DEM(C1, L1)
    p3 = DEM(C1, L1 - 1)
    p7 = DEM(C2, L2 + 1)
    p8 = DEM(C2, L2)
    p9 = DEM(C2, L2 - 1)
    p4 = (p1 + p7) / 2
    p5 = (p2 + p8) / 2
    p6 = (p3 + p9) / 2

    If p3 = -1 Or p9 = -1 Or p6 = p5 Then
        sM1(ic) = -1
    Else
        sM1(ic) = (Dx - sB(ic) / 2) / (p6 - p5)
    End If
    If p1 = -1 Or p7 = -1 Or p4 = p5 Then
        sM2(ic) = -1
    Else
        sM2(ic) = (Dx - sB(ic) / 2) / (p4 - p5)
    End If
    If sM1(ic) < 0 Then sM1(ic) = -1
    If sM2(ic) < 0 Then sM2(ic) = -1
    If sM1(ic) = -1 And sM2(ic) <> -1 Then sM1(ic) = sM2(ic)
    If sM1(ic) <> -1 And sM2(ic) = -1 Then sM2(ic) = sM1(ic)


ElseIf C2 = C1 + 1 And L2 = L1 - 1 Then     'NE
    p1 = DEM(C1, L1)
    p2 = DEM(C2, L1)
    p3 = DEM(C1, L2)
    p4 = DEM(C2, L2)
    p5 = (p1 + p4) / 2

    If p3 = -1 Or p3 = p5 Then
        sM1(ic) = -1
    Else
        sM1(ic) = (0.5 * Sqr(Dx ^ 2 + Dy ^ 2) - sB(ic) / 2) / (p3 - p5)
    End If
    If p2 = -1 Or p2 = p5 Then
        sM2(ic) = -1
    Else
        sM2(ic) = (0.5 * Sqr(Dx ^ 2 + Dy ^ 2) - sB(ic) / 2) / (p2 - p5)
    End If
    If sM1(ic) < 0 Then sM1(ic) = -1
    If sM2(ic) < 0 Then sM2(ic) = -1
    If sM1(ic) = -1 And sM2(ic) <> -1 Then sM1(ic) = sM2(ic)
```

```
    If sM1(ic) <> -1 And sM2(ic) = -1 Then sM2(ic) = sM1(ic)

ElseIf C2 = C1 And L2 = L1 - 1 Then         'N
    p1 = DEM(C1 + 1, L1)
    p2 = DEM(C1, L1)
    p3 = DEM(C1 - 1, L1)
    p7 = DEM(C2 + 1, L2)
    p8 = DEM(C2, L2)
    p9 = DEM(C2 - 1, L2)
    p4 = (p7 + p1) / 2
    p5 = (p8 + p2) / 2
    p6 = (p9 + p3) / 2

    If p3 = -1 Or p9 = -1 Or p6 = p5 Then
        sM1(ic) = -1
    Else
        sM1(ic) = (Dx - sB(ic) / 2) / (p6 - p5)
    End If

    If p1 = -1 Or p7 = -1 Or p4 = p5 Then
        sM2(ic) = -1
    Else
        sM2(ic) = (Dx - sB(ic) / 2) / (p4 - p5)
    End If

    If sM1(ic) < 0 Then sM1(ic) = -1
    If sM2(ic) < 0 Then sM2(ic) = -1
    If sM1(ic) = -1 And sM2(ic) <> -1 Then sM1(ic) = sM2(ic)
    If sM1(ic) <> -1 And sM2(ic) = -1 Then sM2(ic) = sM1(ic)



ElseIf C2 = C1 - 1 And L2 = L1 - 1 Then     'NW
    p1 = DEM(C1, L1)
    p2 = DEM(C1, L2)
    p3 = DEM(C2, L1)
    p4 = DEM(C2, L2)
    p5 = (p1 + p4) / 2

    If p3 = -1 Or p3 = p5 Then
        sM1(ic) = -1
    Else
        sM1(ic) = (0.5 * Sqr(Dx ^ 2 + Dy ^ 2) - sB(ic) / 2) / (p3 - p5)
    End If

    If p2 = -1 Or p2 = p5 Then
        sM2(ic) = -1
    Else
        sM2(ic) = (0.5 * Sqr(Dx ^ 2 + Dy ^ 2) - sB(ic) / 2) / (p2 - p5)
    End If

    If sM1(ic) < 0 Then sM1(ic) = -1
    If sM2(ic) < 0 Then sM2(ic) = -1
    If sM1(ic) = -1 And sM2(ic) <> -1 Then sM1(ic) = sM2(ic)
    If sM1(ic) <> -1 And sM2(ic) = -1 Then sM2(ic) = sM1(ic)


ElseIf C2 = C1 - 1 And L2 = L1 Then         'W
    p1 = DEM(C1, L1 - 1)
    p2 = DEM(C1, L1)
    p3 = DEM(C1, L1 + 1)
    p7 = DEM(C2, L2 - 1)
    p8 = DEM(C2, L2)
    p9 = DEM(C2, L2 + 1)
    p4 = (p1 + p7) / 2
    p5 = (p2 + p8) / 2
    p6 = (p3 + p9) / 2

    If p3 = -1 Or p9 = -1 Or p6 = p5 Then
        sM1(ic) = -1
    Else
        sM1(ic) = (Dy - sB(ic) / 2) / (p6 - p5)
    End If

    If p1 = -1 Or p7 = -1 Or p4 = p5 Then
        sM2(ic) = -1
```

```
            Else
                sM2(ic) = (Dy - sB(ic) / 2) / (p4 - p5)
            End If

            If sM1(ic) < 0 Then sM1(ic) = -1
            If sM2(ic) < 0 Then sM2(ic) = -1
            If sM1(ic) = -1 And sM2(ic) <> -1 Then sM1(ic) = sM2(ic)
            If sM1(ic) <> -1 And sM2(ic) = -1 Then sM2(ic) = sM1(ic)


        ElseIf C2 = C1 - 1 And L2 = L1 + 1 Then     'SW
            p1 = DEM(C1, L1)
            p2 = DEM(C2, L1)
            p3 = DEM(C1, L2)
            p4 = DEM(C2, L2)
            p5 = (p1 + p4) / 2

            If p3 = -1 Or p3 = p5 Then
                sM1(ic) = -1
            Else
                sM1(ic) = (0.5 * Sqr(Dx ^ 2 + Dy ^ 2) - sB(ic) / 2) / (p3 - p5)
            End If
            If p2 = -1 Or p2 = p5 Then
                sM2(ic) = -1
            Else
                sM2(ic) = (0.5 * Sqr(Dx ^ 2 + Dy ^ 2) - sB(ic) / 2) / (p2 - p5)
            End If
            If sM1(ic) < 0 Then sM1(ic) = -1
            If sM2(ic) < 0 Then sM2(ic) = -1
            If sM1(ic) = -1 And sM2(ic) <> -1 Then sM1(ic) = sM2(ic)
            If sM1(ic) <> -1 And sM2(ic) = -1 Then sM2(ic) = sM1(ic)

        Else
            'se tudo estiver OK nunca se deve chegar aqui
            MsgBox "ERRO na definição das prop. do troço " + Str(ic)
        End If


    Next ic



End Sub


Public Function CalculaVolumeEscoado() As Single
'integra o hidrograma, dando o volume escoado numa dada secção


    Dim CelVolEsc As Integer
    Dim canal As Integer
    Dim ic As Integer
    Dim j As Integer

    Dim vol As Single

    CelVolEsc = Val(frmCelulaN.txtCelulaN.Text)

    'descobre qual o troço que parte da célula
    For ic = 1 To Nc
        If no1(ic) = CelVolEsc Then
            canal = ic
            Exit For
        End If
    Next ic


    For j = 1 To Nt - 1
        vol = vol + Dt * (Q1(canal, j) + Q1(canal, j + 1)) / 2
    Next j


    MsgBox Str(vol)

    CalculaVolumeEscoado = vol
```

```
Exit Function
CalculaVolumeEscoado_CANCEL:

End Function

Public Function CoefRugosidade(icel As Integer) As Single
    'CoefRugosidade = Krug(icel)
End Function

Public Sub DesenhaGraficoHidrograma(cel As Integer)

Dim ic As Integer
Dim canal As Integer

Dim it As Single
Dim itch As Integer

Dim iq As Single
Dim ip As Single

Dim x1 As Single
Dim y1 As Single
Dim x2 As Single
Dim y2 As Single

Dim maxChuva As Single
Dim maxCaudal As Single

Dim EscalaChuva As Single
Dim EscalaCaudal As Single


    Call DlinhaA(0, 0, Dt * Nt, 0)
    Call DlinhaA(0, 0, 0, 45)
    Call DlinhaA(0, 45, Dt * Nt, 45)

    If cel = 0 Then Exit Sub

    'descobre qual o troço que parte da célula
    For ic = 1 To Nc
        If no1(ic) = cel Then
            canal = ic
            Exit For
        End If
    Next ic

    If canal = 0 Then Exit Sub


    For itch = 1 To nChuva
        maxChuva = Max(maxChuva, ChuvaDistribuida(cel, itch))
    Next itch
    If maxChuva = 0 Then maxChuva = 10
    EscalaChuva = 10 / maxChuva




    'desenha a escala do tempo
    For it = 0 To Nt + 1 Step Nt / 4
        Call DlinhaA(it * Dt, 44, it * Dt, 46)
        Call DTextoCA(Format(it * Dt / 3600, "0.00"), it * Dt - 10, 45, it * Dt + 10, 51)
    Next it
    Call DTextoEA("(h)", Nt * Dt * 1.02, 45, Nt * Dt * 1.04, 51)


    'desenha a escala do hietograma
    For ip = 0 To maxChuva Step maxChuva / 2
        Call DlinhaA(-1, EscalaChuva * ip, 2, EscalaChuva * ip)
        Call DTextoDA(Format(ip, "0.0"), -10, EscalaChuva * ip, -5, EscalaChuva * ip)
    Next ip
    Call DTextoDA("(mm)", -10, 13, -5, 13)


'desenha a linha do hietograma
```

```
            'precipitação total(P)
            For itch = 1 To nChuva
                x1 = (itch - 1) * dtChuva
                x2 = (itch) * dtChuva
                y1 = EscalaChuva * ChuvaDistribuida(cel, itch)
                Call DlinhaA(x1, y1, x2, y1)
                Call DlinhaA(x1, y1, x1, 0)
                Call DlinhaA(x2, y1, x2, 0)
            Next itch

            If mcPe = 1 Then
                'precipitação efectiva por Green-Ampt
                For itch = 1 To nChuva
                    x1 = (itch - 1) * dtChuva
                    x2 = (itch) * dtChuva
                    y1 = EscalaChuva * ChuvaDistribuidaEfectivaGA(cel, itch)
                    'y2 = EscalaChuva * ChuvaDistribuidaEfectivaGA(cel, itch + 1)
                    Call DlinhaA(x1, y1, x2, y1)
                Next itch
            End If

            If mcPe = 2 Then
                'precipitação efectiva por SCS
                For itch = 1 To nChuva
                    x1 = (itch - 1) * dtChuva
                    x2 = (itch) * dtChuva
                    y1 = EscalaChuva * ChuvaDistribuidaEfectivaSCS(cel, itch)
                    'y2 = EscalaChuva * ChuvaDistribuidaEfectivaSCS(cel, itch + 1)
                    Call DlinhaA(x1, y1, x2, y1)
                Next itch
            End If


            For it = 1 To Nt
                maxCaudal = Max(maxCaudal, Q2(canal, it))
            Next it
            If maxCaudal = 0 Then Exit Sub

            If maxCaudal < 0.00001 Then maxCaudal = 1

            EscalaCaudal = 25 / maxCaudal


            'desenha a escala dos caudais
            For iq = 0 To maxCaudal + 1 Step maxCaudal / 4
                Call DlinhaA(-1, 45 - EscalaCaudal * iq, 2, 45 - EscalaCaudal * iq)
                Call DTextoDA(Format(iq, "0.0"), -10, 45 - EscalaCaudal * iq, -5, 45 - EscalaCaudal * iq)
            Next iq
        '    Call DTextoDA("(m3/s)", -10, 45 - EscalaCaudal * maxCaudal * 1.15, -5, 45 - EscalaCaudal * maxCaudal
* 1.15)
            Call DTextoDA("(m3/s)", -10, 16.5, -5, 16.5)


        'desenha a linha do hidrograma


            For it = 1 To Nt - 1
                x1 = (it - 1) * Dt
                y1 = EscalaCaudal * Q2(canal, it)

                x2 = it * Dt
                y2 = EscalaCaudal * Q2(canal, it + 1)

                Call DlinhaA(x1, 45 - y1, x2, 45 - y2)
            Next it



        End Sub

        Public Sub ExportaMDT_To_Acad()
        Dim iy As Integer
        Dim ix As Integer

            Open "c:\mdt.scr" For Output As #1
```

```
            For iy = 1 To Ny
                For ix = 1 To Nx

                    Print #1, "POINT "; CStr(ix * Dx); ","; CStr(iy * Dy); ","; CStr(10 * DEM(ix, iy))

                Next ix
            Next iy
        Close #1

    End Sub

    Public Sub ExportaMDT3D_To_Acad()
    Dim iy As Integer
    Dim ix As Integer

    Dim x1 As Single
    Dim y1 As Single

    Dim x2 As Single
    Dim y2 As Single

        Open "c:\mdt3D.scr" For Output As #1
            For iy = 1 To Ny
                For ix = 1 To Nx
                    If DEM(ix, iy) <> -1 Then
                        x1 = ix * Dx - Dx / 2
                        y1 = -iy * Dy - Dy / 2
                        x2 = ix * Dx + Dx / 2
                        y2 = -iy * Dy + Dy / 2

                         Print #1, "BOX "; CStr(x1); ","; CStr(y1); " "; CStr(x2); ","; CStr(y2); " "; CStr(10
* DEM(ix, iy))
                    End If
                Next ix
            Next iy
        Close #1

    End Sub




    Public Sub GravaResEscNoPerfil(celula As Integer, t As Single, file As String)
        Dim ic As Integer
        Dim canal As Integer
        Dim j As Integer
        Dim kc As Integer
        Dim Dist As Single

        For ic = 1 To Nc
            If no1(ic) = celula Then
                canal = ic
                Exit For
            End If
        Next ic

        j = t / Dt

        Open file For Output As #1
             Print #1, "  t     celula   cota   canal  ordem    Ks      sB      sM1      sM2      sS0     sL
Dist      Q2     H2     cK   "
             Print #1, " (s)             (m)                 (m1/3/s)  (m)     (m/m)   (m/m)    (m/m)    (m)
(m)       (m3/s)    (m)   (m/s)  "
             Print #1, ""
             ic = canal
             For kc = ic To Nc
                 If no1(kc) = no2(ic) Then
                     Dist = Dist + sL(ic)
                     Print #1, Format(t, "00000"); "   ";
                     Print #1, Format(no2(ic), "0000"); "   ";
                     Print #1, Format(DEM(ixNNo(no2(ic)), iyNNo(no2(ic))), "000.00"); "   ";
                     Print #1, Format(ic, "0000"); "   ";
                     Print #1, Format(Ordem(ic), "000"); "   ";
```

```
                Print #1, Format(Ks(ic), "00.00"); "   ";
                Print #1, Format(sB(ic), "00.00"); "   ";
                Print #1, Format(sM1(ic), "000.00"); "   ";
                Print #1, Format(sM2(ic), "000.00"); "   ";
                Print #1, Format(sS0(ic), "0.000"); "   ";
                Print #1, Format(sL(ic), "000.00"); "   ";
                Print #1, Format(Dist, "00000.00"); "   ";
                Print #1, Format(Q2(ic, j), "000.00"); "   ";
                Print #1, Format(H2(ic, j), "00.00"); "   ";
                Print #1, Format(cK(ic, j), "00.00")
                ic = kc
            End If
        Next kc
    Close #1



End Sub

Public Function Ks(ic As Integer) As Single

    Ks = KsCabeceira + ((Ordem(ic) - 1) * (KsFoz - KsCabeceira) / (Ordem(Nc) - 1))

    'Ks = 3

End Function

Public Sub GeraPerfilLongitudinal(cel As Integer, ficheiro As String)

Dim ix As Integer
Dim iy As Integer
Dim ixx As Integer
Dim iyy As Integer

Dim cota As Single
Dim Dist As Single
Dim distAcum As Single

    ix = ixNNo(cel)
    iy = iyNNo(cel)



    Open ficheiro For Output As #1

        Do
            cota = DEM(ix, iy)
            distAcum = distAcum + Dist

            ixx = ix
            iyy = iy

            Call Direc(ix, iy)

            If ix = ixx Then
                Dist = Dy
            ElseIf iy = iyy Then
                Dist = Dx
            Else
                Dist = Sqr(Dx ^ 2 + Dy ^ 2)
            End If

            Print #1, Format(distAcum, "0000.00"); "    "; Format(cota, "0000.00")
        Loop Until ixx = ix And iyy = iy
    Close #1

End Sub

Public Sub GravaCalculoDaRedeHidrografica(ficheiro As String)
Dim ic As Integer
Dim j As Integer

    Open ficheiro For Output As #1
        Print #1, Nt
        Print #1, Dt
        Print #1, Nc
```

```
            For ic = 1 To Nc
                Print #1, no1(ic)
                Print #1, no2(ic)
                Print #1, Ordem(ic)
                Print #1, sL(ic)
                Print #1, sS0(ic)
                Print #1, sM1(ic)
                Print #1, sM2(ic)
                Print #1, sB(ic)

                For j = 1 To Nt
                    Print #1, Q1(ic, j)
                    Print #1, Q2(ic, j)
                    Print #1, H2(ic, j)
                    Print #1, cK(ic, j)
                Next j
            Next ic
        Close #1

End Sub


Public Sub GravaRedeHidrografica(ficheiro As String)
Dim ic As Integer
Dim j As Integer

    Open ficheiro For Output As #1
        Print #1, Nc
            For ic = 1 To Nc
                Print #1, no1(ic)
                Print #1, no2(ic)
                Print #1, Ordem(ic)
                Print #1, sL(ic)
                Print #1, sS0(ic)
                Print #1, sM1(ic)
                Print #1, sM2(ic)
                Print #1, sB(ic)
            Next ic
        Close #1

End Sub

Public Sub AbreCalculoDaRedeHidrografica(ficheiro As String)

    Dim ic As Integer
    Dim j As Integer

    Open ficheiro For Input As #1
        Input #1, Nt
        Input #1, Dt
        Input #1, Nc

            ReDim no1(Nc) As Integer
            ReDim no2(Nc) As Integer
            ReDim Ordem(Nc) As Integer
            ReDim sL(Nc) As Single
            ReDim sS0(Nc) As Single
            ReDim sM1(Nc) As Single
            ReDim sM2(Nc) As Single
            ReDim sB(Nc) As Single
            ReDim Q1(Nc, Nt) As Single
            ReDim Q2(Nc, Nt) As Single
            ReDim H2(Nc, Nt) As Single
            ReDim cK(Nc, Nt) As Single

            For ic = 1 To Nc
                Input #1, no1(ic)
                Input #1, no2(ic)
                Input #1, Ordem(ic)
                Input #1, sL(ic)
                Input #1, sS0(ic)
                Input #1, sM1(ic)
                Input #1, sM2(ic)
                Input #1, sB(ic)

                For j = 1 To Nt
```

```
                Input #1, Q1(ic, j)
                Input #1, Q2(ic, j)
                Input #1, H2(ic, j)
                Input #1, cK(ic, j)
            Next j
        Next ic
    Close #1

End Sub


Public Sub AbreRedeHidrografica(ficheiro As String)

    Dim ic As Integer
    Dim j As Integer

    Open ficheiro For Input As #1
        Input #1, Nc

            ReDim no1(Nc) As Integer
            ReDim no2(Nc) As Integer
            ReDim Ordem(Nc) As Integer
            ReDim sL(Nc) As Single
            ReDim sS0(Nc) As Single
            ReDim sM1(Nc) As Single
            ReDim sM2(Nc) As Single
            ReDim sB(Nc) As Single

            ReDim Q1(Nc, Nt) As Single
            ReDim Q2(Nc, Nt) As Single
            ReDim H2(Nc, Nt) As Single
            ReDim cK(Nc, Nt) As Single

            For ic = 1 To Nc
                Input #1, no1(ic)
                Input #1, no2(ic)
                Input #1, Ordem(ic)
                Input #1, sL(ic)
                Input #1, sS0(ic)
                Input #1, sM1(ic)
                Input #1, sM2(ic)
                Input #1, sB(ic)
            Next ic
        Close #1

End Sub

Public Sub GravaResultadosDaRedeHidrografica(ficheiro As String)
    Dim ic As Integer


    Open ficheiro For Output As #1

        Print #1, "TROÇO   NÓ1   NÓ2   ORDEM    L     S0     B      M1     M2"
        Print #1, " ID                         (m)   m/m     m     (m/m)  (m/m)"
        For ic = 1 To Nc

            Print #1, "  ";
            Print #1, Format(ic, "0000"); "   ";
            Print #1, Format(no1(ic), "0000"); "  ";
            Print #1, Format(no2(ic), "0000"); "  ";
            Print #1, Format(Ordem(ic), "000"); "  ";
            Print #1, Format(sL(ic), "000.00"); "  ";
            Print #1, Format(sS0(ic), "0.0000"); "  ";
            Print #1, Format(sB(ic), "00.00"); "  ";
            Print #1, Format(sM1(ic), "0.0000"); "  ";
            Print #1, Format(sM2(ic), "0.0000")

        Next ic

    Close #1


End Sub

Public Sub LeCoefRugosidade()
```

```
'Dim ix As Integer
'Dim iy As Integer


    'factor de rugosidade de manning
'    Open fileKManning For Input As #1
'            ReDim Krug(Nx * Ny)
'            For iy = 1 To Ny
'                For ix = 1 To Nx
'                    Input #1, Krug(NNo(ix, iy))
'                Next ix
'            Next iy
'    Close #1

End Sub

Public Sub GeraHidrograma()
    Dim CelHidrograma As Integer
    Dim canal As Integer
    Dim ic As Integer
    Dim j As Integer

    CelHidrograma = Val(frmCelulaN.txtCelulaN.Text)

    'descobre qual o troço que parte da célula
    For ic = 1 To Nc
        If no1(ic) = CelHidrograma Then
            canal = ic
            Exit For
        End If
    Next ic


    On Error GoTo lbGeraHidrograma_CANCEL
    frmPrincipal.dlgCaixaDeDialogo.filename = "hidrograma" + Str(CelHidrograma) + ".txt"
    frmPrincipal.dlgCaixaDeDialogo.Flags = &H2&
    frmPrincipal.dlgCaixaDeDialogo.ShowSave



    Open frmPrincipal.dlgCaixaDeDialogo.filename For Output As #1
        Print #1, "Célula:         "; CelHidrograma
        Print #1, "Canal:          "; canal
        Print #1, "L (m):          "; sL(canal)
        Print #1, "b (m):          "; sB(canal)
        Print #1, "s0 (m/m):       "; sS0(canal)
        Print #1, "m1 (m)          "; sM1(canal)
        Print #1, "m2 (m)          "; sM2(canal)
        Print #1, "Krug (m^.33/s): "; Ks(canal)

        For j = 1 To Nt
            Print #1, j * Dt; ";  "; Q2(ic, j); ";  "; H2(ic, j)
        Next j
    Close #1



Exit Sub
lbGeraHidrograma_CANCEL:

End Sub

Public Sub LeModeloDigitalDoTerreno()
Dim iy As Integer
Dim ix As Integer

    'modelo digital do terreno
    Open fileMDT For Input As #1
            ReDim DEM(Nx, Ny) As Single
            For iy = 1 To Ny
                For ix = 1 To Nx
                    Input #1, DEM(ix, iy)
                Next ix
            Next iy
    Close #1
```

```
End Sub

Public Sub LeQIni()

Dim ix As Integer
Dim iy As Integer
Dim icel As Integer

    'caudais a circularem no instante inicial
'    Open fileQini For Input As #1
'            ReDim Qini(Nx * Ny)
'            For iy = 1 To Ny
'                For ix = 1 To Nx
'                    Input #1, Qini(NNo(ix, iy))
'                Next ix
'            Next iy
'    Close #1

'partindo do principio que são quase nulos
    'caudais a circularem no instante inicial
'    Open fileQini For Input As #1
            ReDim Qini(Nx * Ny)
            icel = 0
            For iy = 1 To Ny
                For ix = 1 To Nx
                    icel = icel + 1
                    Qini(icel) = 0.0000001
                Next ix
            Next iy
'    Close #1



End Sub

Public Function MDT(icel As Integer)

Dim ix As Integer
Dim iy As Integer


    ix = ixNNo(icel)
    iy = iyNNo(icel)


    MDT = DEM(ix, iy)

End Function

Public Sub PreenchePropriedadesDoCanal(celula As Integer)

    Dim ic As Integer
    Dim canal As Integer



        'determina qual o troço
        For ic = 1 To Nc
            If no1(ic) = celula Then
                canal = ic
            End If
        Next ic

        If canal = 0 Then Exit Sub

            frmPropriedadeDoCanal.txtTroco.Text = Str(canal)
            frmPropriedadeDoCanal.txtNo1.Text = Str(no1(canal))
            frmPropriedadeDoCanal.txtNo2.Text = Str(no2(canal))
            frmPropriedadeDoCanal.txtOrdem.Text = Str(Ordem(canal))
            frmPropriedadeDoCanal.txtL.Text = Format(sL(canal), "000.00")
            frmPropriedadeDoCanal.txtB.Text = Format(sB(canal), "000.00")
            frmPropriedadeDoCanal.txtS0.Text = Format(sS0(canal), "0.0000")
            frmPropriedadeDoCanal.txtm1.Text = Format(sM1(canal), "00.000")
```

```
            frmPropriedadeDoCanal.txtm2.Text = Format(sM2(canal), "00.000")
            frmPropriedadeDoCanal.txtKs.Text = Format(Ks(canal), "00.0")



End Sub

Private Function qp(no1 As Integer, no2 As Integer, L As Single, t As Single) As Single
    'caudal de percurso
    'L comprimento do canal




    If mcPe = 1 Then            'green ampt
        qp = qGA(no1, no2, L, t)
    ElseIf mcPe = 2 Then        'scs
        qp = qSCS(no1, no2, L, t)
    Else
        MsgBox "Erro"
    End If

End Function









Private Function fq(q11 As Single, alfa As Single, beta As Single, C As Single, L As Single) As Single
'função utilizada por Newton
'função utilizada por OndaCinamáticaExplicitoNaoLinear

    fq = (Dt / L) * q11 + alfa * q11 ^ beta - C
End Function


Private Function dfq(q11 As Single, alfa As Single, beta As Single, L As Single) As Single

    dfq = (Dt / L) + alfa * beta * q11 ^ (beta - 1)

End Function

Public Sub ExportaMDT_To_Surfer()

Dim iy As Integer
Dim ix As Integer

    Open "c:\mdt.txt" For Output As #1
        For iy = 1 To Ny
            For ix = 1 To Nx
                'If DEM(ix, iy) <> -1 Then
                    Print #1, ix * Dx; "  "; iy * -Dy; "  "; DEM(ix, iy)
                'End If
            Next ix
        Next iy
    Close #1


End Sub

Public Function Newton(Qini As Single, alfa As Single, beta As Single, C As Single, L As Single) As
Single
'resolução numérica de funções não lineares
    Dim X As Single
    Dim Y As Single
    Dim xr As Single
    Dim f As Single
    Dim df As Single
    Dim i As Integer
    Dim erro As Single
```

```
    X = Qini

    For i = 1 To 1000
        If X <= 0 Then
            X = 0
        Else
            df = dfq(X, alfa, beta, L)
        End If
        f = fq(X, alfa, beta, C, L)
        xr = X
        X = X - f / df
        erro = Abs((X - xr) / X)
        If erro < 0.001 Then Exit For
    Next i

    Newton = X
End Function

Public Sub DesenhaCelulas()
Dim X As Single
Dim Y As Single

Dim ix As Integer
Dim iy As Integer

'desenha os nós
For iy = 1 To Ny
    For ix = 1 To Nx
        X = ix * Dx
        Y = iy * Dy

        Call DSetLinhaGrossa
        Call Dponto(X, Y)

        Call DSetLinhaIntermitente
        Call Dlinha(X - Dx / 2, Y + Dy / 2, X + Dx / 2, Y + Dy / 2)
        Call Dlinha(X - Dx / 2, Y - Dy / 2, X + Dx / 2, Y - Dy / 2)
        Call Dlinha(X - Dx / 2, Y + Dy / 2, X - Dx / 2, Y - Dy / 2)
        Call Dlinha(X + Dx / 2, Y + Dy / 2, X + Dx / 2, Y - Dy / 2)
        Call DSetLinhaContinua
    Next ix
Next iy




End Sub


Public Sub DesenhaRedeHidrografica()
Dim x1 As Single
Dim y1 As Single

Dim x2 As Single
Dim y2 As Single

Dim ic As Integer

Dim maxordem As Integer

maxordem = Ordem(Nc)

For ic = 1 To Nc

    x1 = Dx * ixNNo(no1(ic))
    y1 = Dy * iyNNo(no1(ic))

    x2 = Dx * ixNNo(no2(ic))
    y2 = Dy * iyNNo(no2(ic))

    Call DSetLinhaOrdemCor(Ordem(ic), maxordem)
    Call Dlinha(x1, y1, x2, y2)
Next ic
```

```
End Sub

Public Sub ExportaRedeHidrografica()
Dim x1 As Single
Dim y1 As Single

Dim x2 As Single
Dim y2 As Single

Dim ix As Single
Dim iy As Single
Dim X As Single
Dim Y As Single
Dim no As Integer

Dim widt As Single

Dim ic As Integer

Open "c:\RedeHidx.scr" For Output As #1

    'desenha os nós
    Print #1, "color 5"
    For ic = 1 To Nc

        x1 = Dx * ixNNo(no1(ic))
        y1 = -Dy * iyNNo(no1(ic))

        x2 = Dx * ixNNo(no2(ic))
        y2 = -Dy * iyNNo(no2(ic))

        widt = Ordem(ic) * 1.8

         Print #1, "PLINE "; CStr(x1); ","; CStr(y1); " W "; CStr(widt); " "; CStr(widt); " "; CStr(x2);
","; CStr(y2); " "
        'Print #1, "TEXT "; CStr((X1 + X2) / 2); ","; CStr((Y1 + Y2) / 2); "   "; "  " + CStr(ic); "    "
    Next ic


    'desenha as celulas
    Print #1, "color 6"

    no = 0
    For iy = 1 To Ny
        For ix = 1 To Nx
            x = ix * Dx
            y = -iy * Dy
            no = no + 1
            Print #1, "POINT "; CStr(x); ","; CStr(y)
            Print #1, "TEXT "; CStr(x); ","; CStr(y); "   "; CStr(no); "    "

              Print #1, "LINE "; CStr(x - Dx / 2); ","; CStr(y + Dy / 2); " "; CStr(x + Dx / 2); ",";
CStr(y + Dy / 2); " "
              Print #1, "LINE "; CStr(x - Dx / 2); ","; CStr(y - Dy / 2); " "; CStr(x + Dx / 2); ",";
CStr(y - Dy / 2); " "
              Print #1, "LINE "; CStr(x - Dx / 2); ","; CStr(y + Dy / 2); " "; CStr(x - Dx / 2); ",";
CStr(y - Dy / 2); " "
              Print #1, "LINE "; CStr(x + Dx / 2); ","; CStr(y + Dy / 2); " "; CStr(x + Dx / 2); ",";
CStr(y - Dy / 2); " "
         Next ix
    Next iy

'desenha a quadricula
    Print #1, "color 7"


    For ix = 3 To Nx Step 5
       For iy = 3 To Ny Step 5
            X = ix * Dx
            Y = -iy * Dy

             Print #1, "PLINE "; CStr(X - 5 * Dx / 2); ","; CStr(Y + 5 * Dy / 2); " W 10.0 10.0 "; CStr(X
+ 5 * Dx / 2); ","; CStr(Y + 5 * Dy / 2); " "
             Print #1, "PLINE "; CStr(X - 5 * Dx / 2); ","; CStr(Y - 5 * Dy / 2); " W 10.0 10.0 "; CStr(X
+ 5 * Dx / 2); ","; CStr(Y - 5 * Dy / 2); " "
```

```
                Print #1, "PLINE "; CStr(X - 5 * Dx / 2); ","; CStr(Y + 5 * Dy / 2); " W 10.0 10.0 "; CStr(X
- 5 * Dx / 2); ","; CStr(Y - 5 * Dy / 2); " "
                Print #1, "PLINE "; CStr(X + 5 * Dx / 2); ","; CStr(Y + 5 * Dy / 2); " W 10.0 10.0 "; CStr(X
+ 5 * Dx / 2); ","; CStr(Y - 5 * Dy / 2); " "
            Next iy
        Next ix


    Close #1

    End Sub

    Public Sub GravaResEsc(file As String)
    Dim ic As Integer
    Dim j As Integer


        Open file For Output As #1
            Print #1, "Troço   No1    No2     t        Q1          Q2         H        cK"
            Print #1, "                      (s)     (m3/s)      (m3/s)      (m)      (m/s)"

            For ic = 1 To Nc
                Print #1, "t = "; Format(j * Dt, "0000")
                For j = 1 To Nt
                    Print #1, Format(ic, "0000"); "   ";
                    Print #1, Format(no1(ic), "000"); "   ";
                    Print #1, Format(no2(ic), "000"); "   ";
                    Print #1, Format(j * Dt, "0.00"); "   ";
                    Print #1, Format(Q1(ic, j), "000.00"); "   ";
                    Print #1, Format(Q2(ic, j), "000.00"); "   ";
                    Print #1, Format(H2(ic, j), "00.00"); "   ";
                    Print #1, Format(cK(ic, j), "00.00")
                Next j
            Next ic
        Close #1

    End Sub



    Public Sub GravaResEscCelN(cel As Integer, file As String)
    Dim ic As Integer
    Dim troco As Integer
    Dim j As Integer


        For ic = 1 To Nc
            If no1(ic) = cel Then
                troco = ic
                Exit For
            End If
        Next ic


        Open file For Output As #1
            Print #1, "Troço   No1    No2     t       Q1        Q2      H      cK      P      PeGA    PeSCS"
            Print #1, "                      (h)    (m3/s)    (m3/s)   (m)    (m/s)   (mm)    (mm)    (mm)"

                For j = 1 To Nt
                    Print #1, Format(troco, "0000"); "   ";
                    Print #1, Format(no1(troco), "000"); "   ";
                    Print #1, Format(no2(troco), "000"); "   ";
                    Print #1, Format((j - 1) * Dt / 3600, "00.00"); "   ";
                    Print #1, Format(Q1(troco, j), "000.00"); "   ";
                    Print #1, Format(Q2(troco, j), "000.00"); "   ";
                    Print #1, Format(H2(troco, j), "00.00"); "   ";
                    Print #1, Format(cK(troco, j), "00.00"); "   ";
                    Print #1, Format(ChuvaDistribuida(cel, Int(j * Dt / dtChuva) + 1), "000.0"); "   ";
                     Print #1, Format(ChuvaDistribuidaEfectivaGA(cel, Int(j * Dt / dtChuva) + 1), "000.0"); "
";
                    Print #1, Format(ChuvaDistribuidaEfectivaSCS(cel, Int(j * Dt / dtChuva) + 1), "000.0")
                Next j
        Close #1

    End Sub
```

```
Public Sub LeProjecto(fileProjecto As String)
Dim iy As Integer
Dim ix As Integer
Dim ics As Integer
Dim ich As Integer

    'le os dados do projecto
    Open fileProjecto For Input As #1
            Line Input #1, comentario
            Input #1, x0
            Input #1, y0
            Input #1, Nx
            Input #1, Ny
            Input #1, Dx
            Input #1, Dy
            Input #1, Nt
            Input #1, Dt
            Input #1, MaxB
            Input #1, KsCabeceira
            Input #1, KsFoz
            Input #1, fSinAdic
            Line Input #1, fileMDT
            Line Input #1, fileQini
            Line Input #1, fileKManning
            Line Input #1, fileClassesDeSolo
            Line Input #1, fileClassesDeUsoDoSolo
            Line Input #1, fileClassesDeInfilt
            Line Input #1, filePropSolosGA
            Line Input #1, filePropSolosSCS
            Line Input #1, fileChuva
            Line Input #1, fileResEsc
            Line Input #1, fileResChuva
    Close #1




End Sub

Public Sub OndaCinematicaExplicitoLinear()

Dim j As Integer        'iteracção pelo tempo
Dim ic As Integer       'iteracção pelos troços
Dim kc As Integer        'procura pelos troços

Dim n1 As Integer       'nó 1 do troço ic
Dim n2 As Integer       'nó 2 do troço ic


Dim aa As Single        'termos da equação
Dim bb As Single        'termos da equação
Dim cc As Single        'termos da equação
Dim dd As Single        'termos da equação

Dim alfa As Single      'parametros da equação
Dim beta As Single      'parametros da equação

Dim Ph As Single        'perimetro molhado
'Dim L As Single         'comprimento do troço

Dim krg As Single         'coef. de rugosidade
'Dim S0 As Single        'declive

Dim h As Single
Dim hh As Single


    frmProgress.Show
    frmProgress.prgBAR.Min = 0
    frmProgress.prgBAR.Max = Nt
    frmProgress.prgBAR.Value = 0



    beta = 3 / 5
```

```
        'condição inicial
        For ic = 1 To Nc
            Q1(ic, 1) = Qini(no1(ic))
            Q2(ic, 1) = Qini(no2(ic))
        Next ic


        For j = 1 To Nt - 1             'para todos os instantes
            For ic = 1 To Nc            'para todos os troços

                n1 = no1(ic)
                n2 = no2(ic)
                krg = Ks(ic)
                H2(ic, j + 1) = 0.2     'estimativa inicial

                Do
                    h = H2(ic, j + 1)
                    If sM1(ic) <> -1 And sM2(ic) <> -1 Then
                        Ph = sB(ic) + H2(ic, j + 1) * (Sqr(1 + sM1(ic) ^ 2) + Sqr(1 + sM2(ic)))
                    Else
                        Ph = sB(ic) + 2 * H2(ic, j + 1)
                    End If



                    alfa = (Ph ^ (2 / 3) / (krg * sS0(ic) ^ (1 / 2))) ^ (beta)


                    If (Q2(ic, j) + Q1(ic, j + 1)) <> 0 Then
                        aa = (Dt / sL(ic)) * Q1(ic, j + 1)
                        bb = alfa * beta * Q2(ic, j) * ((Q2(ic, j) + Q1(ic, j + 1)) / 2) ^ (beta - 1)
                        cc = Dt * (qp(n1, n2, sL(ic), (j + 1) * Dt) + qp(n1, n2, sL(ic), j * Dt)) / 2
                        dd = ((Dt / sL(ic)) + alfa * beta * ((Q2(ic, j) + Q1(ic, j + 1)) / 2) ^ (beta - 1))

                        Q2(ic, j + 1) = (aa + bb + cc) / dd
                        If Q2(ic, j + 1) = 0 Then
                            cK(ic, j + 1) = 0
                        Else
                            cK(ic, j + 1) = 1 / (alfa * beta * Q2(ic, j + 1) ^ (beta - 1))
                        End If
                        If Q2(ic, j + 1) < 0.0000001 Then
                            H2(ic, j + 1) = 0
                        Else
                            If sM1(ic) <> -1 And sM2(ic) <> -1 Then
                                   H2(ic, j + 1) = CalcHTrapezio(Q2(ic, j + 1), H2(ic, j + 1), krg, sM1(ic),
sM2(ic), sB(ic), sS0(ic), 0.001)
                            Else
                                  H2(ic, j + 1) = CalcHRectangulo(Q2(ic, j + 1), H2(ic, j + 1), krg, sB(ic),
sS0(ic), 0.001)
                            End If
                        End If
                    Else
                        Q2(ic, j + 1) = 0
                    End If
                Loop Until Abs((h - H2(ic, j + 1))) < 0.01
                'após calcular o caudal no nó de jusante do troço ic
                'verifica qual o troço a jusante e
                'soma o caudal ao nó de montante do troço a jusante
                For kc = ic To Nc
                    If no2(ic) = no1(kc) Then
                        Q1(kc, j + 1) = Q1(kc, j + 1) + Q2(ic, j + 1)
                        Exit For
                    End If
                Next kc
            Next ic
        frmProgress.prgBAR.Value = j
        Next j

        Unload frmProgress

    End Sub

    Private Function fQTrapezio(Q As Single, h As Single, K As Single, m1 As Single, m2 As Single, b As
Single, s0 As Single) As Single
```

```
        'funciona en conjunto com a função calcHTrap
        Dim f1 As Single
        Dim f2 As Single



            f1 = K * (0.5 * h * (2 * b + h * (m1 + m2))) ^ (5 / 3) * s0 ^ (1 / 2)
            f2 = (b + h * (Sqr(1 + m1 ^ 2) + Sqr(1 + m2 ^ 2))) ^ (2 / 3)


            fQTrapezio = f1 / f2 - Q


        End Function

        Private Function fQRectang(Q As Single, h As Single, K As Single, b As Single, s0 As Single) As Single
        'funciona en conjunto com a função calcHTrap
        Dim f1 As Single
        Dim f2 As Single



            f1 = K * (b * h) ^ (5 / 3) * s0 ^ (1 / 2)
            f2 = (b + 2 * h) ^ (2 / 3)


            fQRectang = f1 / f2 - Q


        End Function

        Public Function CalcHTrapezio(Q As Single, hini As Single, K As Single, m1 As Single, m2 As Single, b As
Single, s0 As Single, erro As Single) As Single
        'cálculo da altura uniforme numa secção trapezoidal
            'k      coef. de rugosidade
            'm1     tangente do talude 1
            'm2     tangente do talude 2
            'b      largura do rasto do canal
            'so     'declive do perfil longitudinal
            'Q      'caudal



            Dim hr As Single
            Dim i As Integer
            Dim h As Single

            h = hini

            For i = 1 To 1000
                hr = h
                 h = ((Q / (K * s0 ^ 0.5)) ^ 0.6) * ((b + h * (Sqr(1 + m1 ^ 2) + Sqr(1 + m2 ^ 2))) ^ 0.4 / (b +
0.5 * (h * m1 + h * m2)))
                If Abs(h - hr) / Abs(h) < erro Then Exit For
            Next i

            CalcHTrapezio = h

        End Function

        Public Function CalcHRectangulo(Q As Single, hini As Single, K As Single, b As Single, s0 As Single, erro
As Single) As Single
        'cálculo da altura uniforme numa secção trapezoidal
            'k      coef. de rugosidade
            'b      largura do rasto do canal
            'so     'declive do perfil longitudinal
            'Q      'caudal


            Dim hr As Single
            Dim dhi As Single
            Dim dfx As Single
            Dim i As Integer
            Dim f1 As Single
            Dim f2 As Single
            Dim h As Single
```

```
    h = hini

    For i = 1 To 1000
        hr = h
        h = ((Q / (K * s0 ^ 0.5)) ^ 0.6) * ((b + 2 * h) ^ 0.4) / (b)
        If Abs(h - hr) / Abs(h) < erro Then Exit For
    Next i

    CalcHRectangulo = h

End Function

Public Sub OndaCinematicaExplicitoNaoLinear()

Dim j As Integer        'iteracção pelo tempo
Dim ic As Integer       'iteracção pelos troços
Dim kc As Integer       'procura pelos troços

Dim n1 As Integer       'nó 1 do troço ic
Dim n2 As Integer       'no 2 do troço ic


Dim alfa As Single      'parametros da equação
Dim beta As Single      'parametros da equação
Dim C As Single         'parametro dos termos conhecidos

Dim Ph As Single        'perimetro molhado

Dim krg As Single       'coef. de rugosidade

Dim h As Single



    frmProgress.Show
    frmProgress.prgBAR.Min = 0
    frmProgress.prgBAR.Max = Nt
    frmProgress.prgBAR.Value = 0



beta = 3 / 5



    'limpa todos os valores de Q1
    'só os valores de Q2 são necessários como valor necessário
    'para o inicio das iteracções
    For j = 1 To Nt
        For ic = 1 To Nc
            Q1(ic, j) = 0
        Next ic
    Next j




    'condição inicial
    For ic = 1 To Nc
        Q1(ic, 1) = Qini(no1(ic))
        Q2(ic, 1) = Qini(no2(ic))
    Next ic



    For j = 1 To Nt - 1             'para todos os instantes
        For ic = 1 To Nc            'para todos os troços

            n1 = no1(ic)
            n2 = no2(ic)
            krg = Ks(ic)
            H2(ic, j + 1) = 0.2     'estimativa inicial

            Do
```

```
                    h = H2(ic, j + 1)
                    If sM1(ic) <> -1 And sM2(ic) <> -1 Then
                        Ph = sB(ic) + H2(ic, j + 1) * (Sqr(1 + sM1(ic) ^ 2) + Sqr(1 + sM2(ic)))
                    Else
                        Ph = sB(ic) + 2 * H2(ic, j + 1)
                    End If


                    alfa = (Ph ^ (2 / 3) / (krg * sS0(ic) ^ (1 / 2))) ^ (beta)
                     C = (Dt / sL(ic)) * Q1(ic, j + 1) + alfa * Q2(ic, j) ^ beta + Dt * (qp(n1, n2, sL(ic), (j
+ 1) * Dt) + qp(n1, n2, sL(ic), j * Dt)) / 2
                    Q2(ic, j + 1) = Newton(Q2(ic, j + 1), alfa, beta, C, sL(ic))
                    cK(ic, j + 1) = 1 / (alfa * beta * Q2(ic, j + 1) ^ (beta - 1))

                    If Q2(ic, j + 1) < 0.0000001 Then
                        H2(ic, j + 1) = 0
                    Else
                        If sM1(ic) <> -1 And sM2(ic) <> -1 Then
                                 H2(ic, j + 1) = CalcHTrapezio(Q2(ic, j + 1), H2(ic, j + 1), krg, sM1(ic),
sM2(ic), sB(ic), sS0(ic), 0.001)
                        Else
                                H2(ic, j + 1) = CalcHRectangulo(Q2(ic, j + 1), H2(ic, j + 1), krg, sB(ic),
sS0(ic), 0.001)
                        End If
                    End If
                Loop Until Abs((h - H2(ic, j + 1))) < 0.01

                'após calcular o caudal a jusante do troço ic
                'verifica qual o troço a jusante e
                'soma o caudal ao nó de montante do troço a jusante
                For kc = ic To Nc
                    If no2(ic) = no1(kc) Then
                        Q1(kc, j + 1) = Q1(kc, j + 1) + Q2(ic, j + 1)
                        Exit For
                    End If
                Next kc

            Next ic

        frmProgress.prgBAR.Value = j
        Next j


        Unload frmProgress

    End Sub


    Public Sub Direc(ix As Integer, iy As Integer)
    'devolve a linha e coluna da celula na vizinhança
    'da celula corrente, em cuja direcção o declive
    'é maior


    Dim dE As Single
    Dim dW As Single
    Dim dN As Single
    Dim dS As Single
    Dim dNE As Single
    Dim dSE As Single
    Dim dNW As Single
    Dim dSW As Single

    Dim d As Single
    Dim nd As Integer

    'calcula os declives nas 8 direcções possiveis
    'os declives são positivos no sentido descendente
        If ix < Nx Then
            If DEM(ix + 1, iy) <> -1 Then
                dE = -(DEM(ix + 1, iy) - DEM(ix, iy)) / Dx
            End If
        End If

        If ix > 1 Then
            If DEM(ix - 1, iy) <> -1 Then
```

```
            dW = -(DEM(ix - 1, iy) - DEM(ix, iy)) / Dx
        End If
    End If

    If iy < Ny Then
        If DEM(ix, iy + 1) <> -1 Then
            dN = -(DEM(ix, iy + 1) - DEM(ix, iy)) / Dx
        End If
    End If

    If iy > 1 Then
        If DEM(ix, iy - 1) <> -1 Then
            dS = -(DEM(ix, iy - 1) - DEM(ix, iy)) / Dx
        End If
    End If


    If ix < Nx And iy < Ny Then
        If DEM(ix + 1, iy + 1) <> -1 Then
            dNE = -(DEM(ix + 1, iy + 1) - DEM(ix, iy)) / (Dx * Sqr(2))   '(5)
        End If
    End If

    If ix < Nx And iy > 1 Then
        If DEM(ix + 1, iy - 1) <> -1 Then
            dSE = -(DEM(ix + 1, iy - 1) - DEM(ix, iy)) / (Dx * Sqr(2))
        End If
    End If

    If ix > 1 And iy < Ny Then
        If DEM(ix - 1, iy + 1) <> -1 Then
            dNW = -(DEM(ix - 1, iy + 1) - DEM(ix, iy)) / (Dx * Sqr(2))
        End If
    End If

    If ix > 1 And iy > 1 Then
        If DEM(ix - 1, iy - 1) <> -1 Then
            dSW = -(DEM(ix - 1, iy - 1) - DEM(ix, iy)) / (Dx * Sqr(2))
        End If
    End If


'determina qual o maior declive
    If dE > d Then
        d = dE
        nd = 1
    End If
    If dW > d Then
        d = dW
        nd = 2
    End If
    If dN > d Then
        d = dN
        nd = 3
    End If
    If dS > d Then
        d = dS
        nd = 4
    End If

    If dNE > d Then
        d = dNE
        nd = 5
    End If
    If dSE > d Then
        d = dSE
        nd = 6
    End If
    If dNW > d Then
        d = dNW
        nd = 7
    End If
    If dSW > d Then
        d = dSW
        nd = 8
    End If
```

```
    If nd = 1 Then
        ix = ix + 1
    End If
    If nd = 2 Then
        ix = ix - 1
    End If
    If nd = 3 Then
        iy = iy + 1
    End If
    If nd = 4 Then
        iy = iy - 1
    End If

    If nd = 5 Then
        ix = ix + 1
        iy = iy + 1
    End If
    If nd = 6 Then
        ix = ix + 1
        iy = iy - 1
    End If
    If nd = 7 Then
        ix = ix - 1
        iy = iy + 1
    End If
    If nd = 8 Then
        ix = ix - 1
        iy = iy - 1
    End If

End Sub


Public Sub GeraRede()

Dim iy As Integer
Dim ix As Integer

Dim ix1 As Integer
Dim iy1 As Integer

Dim ix2 As Integer
Dim iy2 As Integer

Dim ord As Integer

Dim n1 As Integer
Dim n2 As Integer

Dim ic As Integer
Dim icid As Integer

Dim x1 As Single
Dim y1 As Single
Dim x2 As Single
Dim y2 As Single

Dim Identico As Boolean


    frmProgress.Show
    frmProgress.prgBAR.Min = 0
    frmProgress.prgBAR.Max = Nx * Ny
    frmProgress.prgBAR.Value = 0




    For iy = 1 To Ny
        For ix = 1 To Nx
            If DEM(ix, iy) <> -1 Then
                 ix1 = ix
```

```
                iy1 = iy

                ix2 = ix
                iy2 = iy

                ord = 0

                Do
                   ord = ord + 1
                   Call Direc(ix2, iy2)
                   n1 = NNo(ix1, iy1)
                   n2 = NNo(ix2, iy2)
                   If n1 = n2 Then Exit Do ' fim do caminho

                   Identico = False
                   For ic = 1 To Nc    'procura por todos os troços
                       If no1(ic) = n1 And no2(ic) = n2 Then
                           'se o par n1, n2 constar no registo
                           'dos troços de canal, não regista o
                           'par corrente. Apenas altera a ordem
                           'para a maior.
                           Identico = True
                           'é o numero do troço coincidente
                           icid = ic
                           Exit For
                       End If
                   Next ic

                   If Identico = False Then
                       Nc = Nc + 1

                       ReDim Preserve no1(Nc) As Integer
                       ReDim Preserve no2(Nc) As Integer
                       ReDim Preserve Ordem(Nc) As Integer

                       no1(Nc) = n1
                       no2(Nc) = n2
                       Ordem(Nc) = MaxInt(Ordem(Nc), ord)
                   Else
                       'se os dois nós do troço forem iguais
                       'a ordem é a maxima, por quaisquer
                       'dos caminhos possiveis
                       Ordem(icid) = MaxInt(Ordem(icid), ord)
                   End If

                   'o nó 2 do troço corrente é o nó 1 do troço
                   'seguinte do mesmo caminho
                   ix1 = ix2
                   iy1 = iy2
                Loop While n1 <> n2
            End If

            frmProgress.prgBAR.Value = frmProgress.prgBAR.Value + 1

        Next ix
    Next iy

'ordena os troços pela sua ordem
    Call OrdenaRede


'calcula os comprimentos dos troços
    ReDim sL(Nc) As Single
    For ic = 1 To Nc
        x1 = Dx * ixNNo(no1(ic))
        y1 = Dy * iyNNo(no1(ic))

        x2 = Dx * ixNNo(no2(ic))
        y2 = Dy * iyNNo(no2(ic))

        sL(ic) = fSinAdic * Sqr((x2 - x1) ^ 2 + (y2 - y1) ^ 2)
    Next ic

'calcula os declives dos troços
    ReDim sS0(Nc) As Single
    For ic = 1 To Nc
```

```
        n1 = no1(ic)
        n2 = no2(ic)
        sS0(ic) = (DEM(ixNNo(n1), iyNNo(n1)) - DEM(ixNNo(n2), iyNNo(n2))) / sL(ic)
    Next ic

'calcula os parâmetros da secção transversal
    ReDim sM1(Nc) As Single
    ReDim sM2(Nc) As Single
    ReDim sB(Nc) As Single
    Call CalculaSecT


    Unload frmProgress
End Sub



Public Function Max(a As Single, b As Single) As Single

    If a > b Then
        Max = a
    Else
        Max = b
    End If

End Function

Public Function MaxInt(a As Integer, b As Integer) As Integer

    If a > b Then
        MaxInt = a
    Else
        MaxInt = b
    End If

End Function


Public Function Min(a As Single, b As Single) As Single

    If a < b Then
        Min = a
    Else
        Min = b
    End If

End Function

Public Function NNo(ix As Integer, iy As Integer) As Integer
'devolve o numero do NO em função da linha e coluna
    NNo = (iy - 1) * Nx + ix

End Function


Public Function iyNNo(no As Integer)
'devolve a linha do NO em função do seu numero

    If Frac(no / Nx) = 0 Then
        iyNNo = Int(no / Nx)
    Else
        iyNNo = Int(no / Nx) + 1
    End If

End Function

Public Function ixNNo(no As Integer)
'devolve a coluna do NO em função do seu numero


    ixNNo = no - (iyNNo(no) - 1) * Nx

End Function
```

```
Public Sub OrdenaRede()
    'ordena os troços de canal pela sua ordem
    'algoritmo de 'selection sort'

    Dim ic As Integer
    Dim m As Integer
    Dim j As Integer

    Dim t1 As Single
    Dim t2 As Single
    Dim t3 As Single

    If Nc < 2 Then Exit Sub

    For ic = 1 To Nc - 1
        For j = ic + 1 To Nc
            If Ordem(ic) > Ordem(j) Then
                    t1 = no1(ic)
                    t2 = no2(ic)
                    t3 = Ordem(ic)

                    no1(ic) = no1(j)
                    no2(ic) = no2(j)
                    Ordem(ic) = Ordem(j)

                    no1(j) = t1
                    no2(j) = t2
                    Ordem(j) = t3
            End If
        Next j
    Next ic

    Open "c:\rede.txt" For Output As #1
    Print #1, " C         N1    N2    Ordem"
        For ic = 1 To Nc
                Print #1, Format(ic, "00"); Format(no1(ic), "00"); "   "; Format(no2(ic), "00"); "   ";
Format(Ordem(ic), "00"); "  "
        Next ic
    Close #1

    ReDim Q1(Nc, Nt) As Single
    ReDim Q2(Nc, Nt) As Single
    ReDim H2(Nc, Nt) As Single
    ReDim cK(Nc, Nt) As Single
End Sub
```

B.2 - Módulo Infiltração

```
Attribute VB_Name = "mdlInfilt"
Option Base 1
Option Explicit


'classes de solo
    Private ncSolos As Integer
    Private CSolos() As Integer

'usos do solo
    Private ncUsoSolo As Integer
    Private CUsoSolo() As Integer           'classes de uso do solo

'combinação de classe de solo com uso do solo - classe de infiltração
    Private ncInfilt As Integer        'numero de classes de infiltração
    Private InfS() As Integer          'csolo da classe de infilt i
    Private InfUS() As Integer         'cusosolo da classe de infilt i
    Private CInfilt() As Integer       'classe de infiltração

'propriedades das classes de infiltração para GreenAmpt
    Private ncInfiltGA As Integer       'deverá ser = a ncInfilt
    Private Nsolo() As Single           'porosidade
    Private NEsolo() As Single          'porosidade efectiva
```

```
    Private PSIsolo() As Single         'altura de sucção
    Private Ksolo() As Single           'conductividade hidraulica
    Private SEsolo() As Single          'saturação efectiva inicial do solo

'propriedades das classes de infiltração para o método da curva numero
'do soil conservation service
    Private ncInfiltSCS As Integer      'deverá ser = a ncInfilt
    Private amc() As Integer            'antecedent moisture contition (1 2 3)
    Private SoloGrupo() As Integer      'grupo de solo A B C D (1 2 3 4)
    Private cn() As Single              'curva numero

'dados relativos à chuva
    Private nEstac As Integer           'numero de estações
    Public dtChuva As Single            'intervalo de tempo entre registos (s)
    Private NomeEstac() As String       'nome das estações
    Private xEstac() As Single          'coordenada x da estação
    Private yEstac() As Single          'coordenada y da estação
    Public nChuva As Integer            'numero de registos em cada estação
    Private Chuva() As Single           'registos da pluviosidade

    Private ChuvaDist() As Single

'variaveis para o cálculo do excesso de precipitação
    Private ExChuvaGA() As Single         'excesso de chuva por GreenAmpt (mm/hora)
    Private ExChuvaSCS() As Single        'excesso de chuva pelo SCS      (mm/hora)


Public Function AntecedentMoistureCondition(icel As Integer) As Integer
    AntecedentMoistureCondition = amc(CInfilt(icel))
End Function


Public Function CalculaNumClassesSolos()
Dim icel As Integer
Dim numcl As Integer


    For icel = 1 To (Nx * Ny)

        numcl = Maximo(numcl, CSolos(icel))

    Next icel

    CalculaNumClassesSolos = numcl

End Function

Public Function CalculaNumClassesInfilt()
Dim icel As Integer
Dim numcl As Integer


    For icel = 1 To (Nx * Ny)
        numcl = Maximo(numcl, CInfilt(icel))
    Next icel


    CalculaNumClassesInfilt = numcl

End Function

Public Function CalculaNumClassesUsoSolo()
Dim icel As Integer
Dim numcl As Integer


    For icel = 1 To (Nx * Ny)
        numcl = Maximo(numcl, CUsoSolo(icel))
    Next icel


    CalculaNumClassesUsoSolo = numcl

End Function
Public Sub CalculoDeAreas()
```

```
Dim isolo As Integer
Dim icel As Integer

Dim iy As Integer
Dim ix As Integer

Dim Area As Single

    'determina a área de cada uma das classes de solo

    Open "c:\areas.txt" For Output As #1

        Print #1, "AREAS DAS CLASSES DE SOLO"
        Print #1, "CSOLO    ÁREA(m2)"

        For isolo = 1 To ncSolos
            icel = 0
            Area = 0
            For iy = 1 To Ny
                For ix = 1 To Nx
                    icel = icel + 1
                    If CSolos(icel) = isolo Then
                        Area = Area + Dx * Dy
                    End If
                Next ix
            Next iy
            Print #1, isolo; "  "; Format(Area, "00000000")
        Next isolo



        Print #1, "AREAS DAS CLASSES DE USO DO SOLO"
        Print #1, "CSOLO    ÁREA(m2)"

        For isolo = 1 To ncUsoSolo
            icel = 0
            Area = 0
            For iy = 1 To Ny
                For ix = 1 To Nx
                    icel = icel + 1
                    If CUsoSolo(icel) = isolo Then
                        Area = Area + Dx * Dy
                    End If
                Next ix
            Next iy
            Print #1, isolo; "  "; Format(Area, "00000000")
        Next isolo


        Print #1, "AREAS DAS CLASSES DE INFILTRAÇÃO"
        Print #1, "CINFILT    ÁREA(m2)"

        For isolo = 1 To ncInfilt
            icel = 0
            Area = 0
            For iy = 1 To Ny
                For ix = 1 To Nx
                    icel = icel + 1
                    If CInfilt(icel) = isolo Then
                        Area = Area + Dx * Dy
                    End If
                Next ix
            Next iy
            Print #1, isolo; "  "; Format(Area, "00000000")
        Next isolo

    Close #1
End Sub

Public Function ChuvaDistribuida(cel As Integer, itChuva As Integer) As Single


    If itChuva <= nChuva Then
        ChuvaDistribuida = ChuvaDist(cel, itChuva)
    Else
        ChuvaDistribuida = 0
```

```
    End If

End Function

Public Function ChuvaDistribuidaEfectivaGA(cel As Integer, itChuva As Integer) As Single

    If itChuva <= nChuva Then
        ChuvaDistribuidaEfectivaGA = ExChuvaGA(cel, itChuva)
    Else
        ChuvaDistribuidaEfectivaGA = 0
    End If


End Function



Public Function ChuvaDistribuidaEfectivaSCS(cel As Integer, itChuva As Integer) As Single


    If itChuva <= nChuva Then
        ChuvaDistribuidaEfectivaSCS = ExChuvaSCS(cel, itChuva)
    Else
        ChuvaDistribuidaEfectivaSCS = 0
    End If

End Function


Public Function ClasseInfiltracao(icel As Integer) As Integer
    ClasseInfiltracao = CInfilt(icel)
End Function

Public Function ClasseSolo(icel As Integer) As Integer
    ClasseSolo = CSolos(icel)
End Function

Public Function ClasseUsoSolo(icel As Integer) As Integer
    ClasseUsoSolo = CUsoSolo(icel)
End Function


Public Function ConductividadeHidraulica(icel As Integer) As Single
    ConductividadeHidraulica = Ksolo(CInfilt(icel))
End Function

Public Function CurvaNumero(icel As Integer) As Single
    CurvaNumero = cn(CInfilt(icel))
End Function

Public Sub ExportaSolos_To_Acad()

Dim icel As Integer
Dim ix As Integer
Dim iy As Integer

Dim cs As Integer

Dim X As Single
Dim Y As Single

Dim p1x As Single
Dim p1y As Single

Dim p2x As Single
Dim p2y As Single

Dim p3x As Single
Dim p3y As Single

Dim p4x As Single
Dim p4y As Single

Dim icsolo As Integer

Open "c:\solos.scr" For Output As #1
```

```
            icel = 0
            For iy = 1 To Ny
                For ix = 1 To Nx
                    icel = icel + 1


                    X = ix * Dx
                    Y = -iy * Dy

                    p1x = X - Dx / 2
                    p1y = Y - Dy / 2

                    p2x = X - Dx / 2
                    p2y = Y + Dy / 2

                    p3x = X + Dx / 2
                    p3y = Y - Dx / 2

                    p4x = X + Dx / 2
                    p4y = Y + Dx / 2

                    cs = CSolos(icel)
                    If cs = -1 Then cs = 255

                    Print #1, "COLOR "; CStr(cs)
                         Print #1, "SOLID "; CStr(p1x); ","; CStr(p1y); " "; CStr(p2x); ","; CStr(p2y); " ";
CStr(p3x); ","; CStr(p3y); " "; CStr(p4x); ","; CStr(p4y); " "

                Next ix
            Next iy


            p1x = 1.1 * (Dx * Nx)
            p2x = 1.1 * (Dx * Nx)
            p3x = 1.1 * (Dx * Nx) + Dx
            p4x = 1.1 * (Dx * Nx) + Dx

            For icsolo = 1 To ncSolos
                p1y = -icsolo * (1.5 * Dy)
                p2y = p1y - Dy
                p3y = -icsolo * (1.5 * Dy)
                p4y = p1y - Dy
                Print #1, "COLOR "; CStr(icsolo)
                  Print #1, "SOLID "; CStr(p1x); ","; CStr(p1y); " "; CStr(p2x); ","; CStr(p2y); " "; CStr(p3x);
","; CStr(p3y); " "; CStr(p4x); ","; CStr(p4y); " "
                Print #1, "TEXT "; CStr(p4x); ","; CStr(p4y); "   "; CStr(icsolo) + " - XXXX"; "    "
            Next icsolo

        Close #1


        End Sub



        Public Sub ExportaUsoSolo_To_Acad()

        Dim icel As Integer
        Dim ix As Integer
        Dim iy As Integer

        Dim cs As Integer

        Dim X As Single
        Dim Y As Single

        Dim p1x As Single
        Dim p1y As Single

        Dim p2x As Single
        Dim p2y As Single

        Dim p3x As Single
        Dim p3y As Single
```

```
        Dim p4x As Single
        Dim p4y As Single

        Dim icsolo As Integer



        Open "c:\Usosolo.scr" For Output As #1

            icel = 0
            For iy = 1 To Ny
                For ix = 1 To Nx
                    icel = icel + 1


                    X = ix * Dx
                    Y = -iy * Dy

                    p1x = X - Dx / 2
                    p1y = Y - Dy / 2

                    p2x = X - Dx / 2
                    p2y = Y + Dy / 2

                    p3x = X + Dx / 2
                    p3y = Y - Dx / 2

                    p4x = X + Dx / 2
                    p4y = Y + Dx / 2

                    cs = CUsoSolo(icel)
                    If cs = -1 Then cs = 255

                    Print #1, "COLOR "; CStr(cs)
                         Print #1, "SOLID "; CStr(p1x); ","; CStr(p1y); " "; CStr(p2x); ","; CStr(p2y); " ";
CStr(p3x); ","; CStr(p3y); " "; CStr(p4x); ","; CStr(p4y); " "

                Next ix
            Next iy


            p1x = 1.1 * (Dx * Nx)
            p2x = 1.1 * (Dx * Nx)
            p3x = 1.1 * (Dx * Nx) + Dx
            p4x = 1.1 * (Dx * Nx) + Dx


            For icsolo = 1 To ncUsoSolo
                p1y = -icsolo * (1.5 * Dy)
                p2y = p1y - Dy
                p3y = -icsolo * (1.5 * Dy)
                p4y = p1y - Dy
                Print #1, "COLOR "; CStr(icsolo)
                  Print #1, "SOLID "; CStr(p1x); ","; CStr(p1y); " "; CStr(p2x); ","; CStr(p2y); " "; CStr(p3x);
","; CStr(p3y); " "; CStr(p4x); ","; CStr(p4y); " "
                Print #1, "TEXT "; CStr(p4x); ","; CStr(p4y); "   "; CStr(icsolo) + " - XXXX"; "    "
            Next icsolo


        Close #1


        End Sub




        Public Sub ExportaCInfilt_To_Acad()

        Dim icel As Integer
        Dim ix As Integer
        Dim iy As Integer

        Dim cs As Integer
```

```
        Dim X As Single
        Dim Y As Single

        Dim p1x As Single
        Dim p1y As Single

        Dim p2x As Single
        Dim p2y As Single

        Dim p3x As Single
        Dim p3y As Single

        Dim p4x As Single
        Dim p4y As Single

        Dim icsolo As Integer

        Open "c:\CInfilt.scr" For Output As #1

            icel = 0
            For iy = 1 To Ny
                For ix = 1 To Nx
                    icel = icel + 1


                    X = ix * Dx
                    Y = -iy * Dy

                    p1x = X - Dx / 2
                    p1y = Y - Dy / 2

                    p2x = X - Dx / 2
                    p2y = Y + Dy / 2

                    p3x = X + Dx / 2
                    p3y = Y - Dx / 2

                    p4x = X + Dx / 2
                    p4y = Y + Dx / 2

                    cs = CInfilt(icel)
                    If cs = -1 Then cs = 255

                    Print #1, "COLOR "; CStr(cs)
                         Print #1, "SOLID "; CStr(p1x); ","; CStr(p1y); " "; CStr(p2x); ","; CStr(p2y); " ";
CStr(p3x); ","; CStr(p3y); " "; CStr(p4x); ","; CStr(p4y); " "

                Next ix
            Next iy


            p1x = 1.1 * (Dx * Nx)
            p2x = 1.1 * (Dx * Nx)
            p3x = 1.1 * (Dx * Nx) + Dx
            p4x = 1.1 * (Dx * Nx) + Dx

            For icsolo = 1 To ncInfilt
                p1y = -icsolo * (1.5 * Dy)
                p2y = p1y - Dy
                p3y = -icsolo * (1.5 * Dy)
                p4y = p1y - Dy
                Print #1, "COLOR "; CStr(icsolo)
                 Print #1, "SOLID "; CStr(p1x); ","; CStr(p1y); " "; CStr(p2x); ","; CStr(p2y); " "; CStr(p3x);
","; CStr(p3y); " "; CStr(p4x); ","; CStr(p4y); " "
                 Print #1, "TEXT "; CStr(p4x); ","; CStr(p4y); "    "; CStr(icsolo); " - ("; CStr(InfS(icsolo));
")-("; CStr(InfUS(icsolo)); ")"; "    "
            Next icsolo



        Close #1


        End Sub
```

```
Public Function CalculaVolumePrecipitacaoTotal()
Dim vp As Single
Dim ich As Integer
Dim icel As Integer

    vp = 0
    For icel = 1 To (Nx * Ny)
        If CInfilt(icel) <> -1 Then
            For ich = 1 To nChuva

                vp = vp + ChuvaDist(icel, ich) * Dx * Dy / 1000

            Next ich
        End If
    Next icel

    CalculaVolumePrecipitacaoTotal = vp

End Function


Public Function CalculaVolumePrecipitacaoEfectivaTotalGA()
Dim vp As Single
Dim ich As Integer
Dim icel As Integer

    vp = 0
    For icel = 1 To (Nx * Ny)
        For ich = 1 To nChuva
            vp = vp + ExChuvaGA(icel, ich) * Dx * Dy / 1000
        Next ich
    Next icel

    CalculaVolumePrecipitacaoEfectivaTotalGA = vp

End Function

Public Function CalculaVolumePrecipitacaoEfectivaTotalSCS()
Dim vp As Single
Dim ich As Integer
Dim icel As Integer

    vp = 0
    For icel = 1 To (Nx * Ny)
        For ich = 1 To nChuva

           'm3
            vp = vp + ExChuvaSCS(icel, ich) * Dx * Dy / 1000

        Next ich
    Next icel

    CalculaVolumePrecipitacaoEfectivaTotalSCS = vp

End Function

Public Function Porosidade(icel As Integer) As Single
    Porosidade = Nsolo(CInfilt(icel))
End Function

Public Function PorosidadeEfectiva(icel As Integer) As Single
    PorosidadeEfectiva = NEsolo(CInfilt(icel))
End Function

Public Function qGA(no1 As Integer, no2 As Integer, L As Single, t As Single) As Single
    'caudal de percurso
    't em segundos

    Dim exch As Single


    'converte de mm por dtchuva para  (mm/hora = litros/hora)
'    exch = ((ExcessoDeChuvaGA(no1, t) + ExcessoDeChuvaGA(no2, t)) / 2) / (dtChuva / 3600)
    exch = ExcessoDeChuvaGA(no1, t) / (dtChuva / 3600)

    'mm*m*m = litro
```

```
    'converte de litros/hora para litros/segundo para m3/segundo/m
    qGA = Dx * Dy * exch / 3600 / 1000 / L


End Function



Public Function qSCS(no1 As Integer, no2 As Integer, L As Single, t As Single) As Single
    'caudal de percurso
    't em segundos
    Dim exch As Single

    'em mm/hora
'    exch = ((ExcessoDeChuvaSCS(no1, t) + ExcessoDeChuvaSCS(no2, t)) / 2) / (dtChuva / 3600)
'                mm                  /    horas
    exch = ExcessoDeChuvaSCS(no1, t) / (dtChuva / 3600)

    'mm*m*m = litro

    'converte de litros/hora para litros/segundo para m3/segundo/m
    '     ( litros/hora   /
    qSCS = Dx * Dy * exch / 3600 / 1000 / L


End Function
Public Sub CalculaDistChuva()
'calcula a distribuição da precipitação pelo inverso das distancias
'às estações meteorologicas

'variáveis para o cálculo da distribuição da precipitação
'pelo inverso das distâncias
    Dim Dist() As Single
    Dim n1 As Single
    Dim n2 As Single

    Dim icel As Integer         'contagem das células
    Dim ich As Integer          'contagem dos intervalos de tempo
    Dim ix As Integer           'contagem de coluna
    Dim iy As Integer           'contagem de linha

    Dim xcelula As Single       'coordenada x da célula corrente
    Dim ycelula As Single       'coordenada y da célula corrente

'variáveis de contagem
    Dim iEstac As Integer       'contagem das estações meteorologicas



    ReDim Dist(nEstac) As Single
    ReDim ChuvaDist(Nx * Ny, nChuva) As Single


    icel = 0
    For iy = 1 To Ny         'para todas as células
        For ix = 1 To Nx
            icel = icel + 1     'contagem do numero de célula
            xcelula = x0 + ix * Dx 'calculo da coordenada x da célula
            ycelula = y0 + iy * -Dy 'cálculo da coordenada y da célula

            If CInfilt(icel) <> -1 Then

                'cálcula as distancias a cada uma das estações
                For iEstac = 1 To nEstac
                    Dist(iEstac) = Sqr((xcelula - xEstac(iEstac)) ^ 2 + (ycelula - yEstac(iEstac)) ^ 2)
                Next iEstac
                'cálcula a precipitação para cada célula como uma
                'média ponderada pelo inverso da distância a cada uma
                'das respectivas estações
                For ich = 1 To nChuva          'para todos os intervalos de tempo
                    n1 = 0
                    n2 = 0
                    For iEstac = 1 To nEstac
                        n1 = n1 + Chuva(iEstac, ich) * (1 / Dist(iEstac))
                        n2 = n2 + (1 / Dist(iEstac))
```

```
                    Next iEstac
                    ChuvaDist(icel, ich) = n1 / n2
                Next ich
            Else
                For ich = 1 To nChuva          'para todos os intervalos de tempo
                    ChuvaDist(icel, ich) = -10000
                Next ich
            End If
        Next ix
    Next iy


'    Open "c:\chuvadist.txt" For Output As #1
'           For ich = 1 To nChuva
'               Print #1, ChuvaDist(565, ich)
'           Next ich
'    Close #1



End Sub


Public Sub CalculaExcessoChuvaGAXXXBAK()
'cálculo do excesso de precipitção recorrendo à
'equação de Green Ampt
'o excesso de precipitação é dado em mm/hora


'variáveis para o cálculo do excesso de chuva
'pelo método de GreenAmpt
    Dim ChuvaAcumGA() As Single       'chuva acumulada
    Dim ChuvaIntGA() As Single        'intencidade de precipitação
    Dim InfiltMaxGA() As Single       'taxa potencial maxima de infiltração
    Dim InfiltAcumGA() As Single      'infiltração acumulada
    Dim Pond() As Boolean             'verdadeiro se ocorrer excesso de precipitação
    Dim pondi() As Boolean            'identifica os intervalos em que se verifica excesso de precipi.
    Dim ExChuvaAcumGA() As Single     'excesso de chuva acumulado


    Dim Ft1 As Single           'variáveis para o cálculo por substituições
    Dim Ftx As Single           'sucessivas da eq. de Green Ampt
    Dim Ft As Single
    Dim i As Integer            'contagem das iteracções para a resolução
    Dim dTeta As Single         'variação do teor de humidade volumétrico
                                'da eq. de Green Ampt


    Dim icel As Integer         'contagem das células
    Dim ix As Integer           'contagem de coluna
    Dim iy As Integer           'contagem de linha
    Dim ich As Single           'contagem do intervalo de tempo

'classe de solo
    Dim cs As Integer           'identificação da classe de solo a que a
                                'célula corrente pertence
'intervalo de tempo
    Dim dtCh As Single          'incremento de tempo




    'ReDim ChuvaGA(Nx * Ny, nChuva) As Single

    ReDim ChuvaAcumGA(nChuva) As Single     'chuva acumulada
    ReDim ChuvaIntGA(nChuva) As Single      'intensidade de precipitação
    ReDim InfiltMaxGA(nChuva) As Single     'infiltração máxima
    ReDim InfiltAcumGA(nChuva) As Single    'infiltração acumulada
    ReDim Pond(nChuva) As Boolean
    ReDim pondi(nChuva) As Boolean
    ReDim ExChuvaAcumGA(nChuva) As Single

    ReDim ExChuvaGA(Nx * Ny, nChuva)
```

```
'nesta rotina a unidade de tempo é a hora
'assim o valor do intervalo de tempo entre registos é a hora
dtCh = dtChuva / 3600 'conversão de segundos para horas



icel = 0
For ix = 1 To Nx         'para todas as células
    For iy = 1 To Ny
        icel = icel + 1     'contagem do numero de célula


                'com base na precipitação, cálcula a precipitação efectiva

                cs = CInfilt(icel)        'classe de solo da célula corrente
                If cs <> -1 Then
                    'calcula a variação do teor de humidade
                    dTeta = (1 - SEsolo(cs)) * NEsolo(cs)


                    'chuva acumulada
                    For ich = 2 To nChuva
                        ChuvaAcumGA(ich) = ChuvaAcumGA(ich - 1) + ChuvaDist(icel, ich)
                    Next ich

                    'intensidade de precipitação
                    For ich = 1 To nChuva - 1
                        ChuvaIntGA(ich) = (ChuvaAcumGA(ich + 1) - ChuvaAcumGA(ich)) / dtCh
                    Next ich

                    'infiltração potencial máxima
                    For ich = 1 To nChuva
                        If ich = 1 Then
                            InfiltMaxGA(ich) = 99999
                        Else
                             InfiltMaxGA(ich) = Ksolo(cs) * ((PSIsolo(cs) * dTeta) / ChuvaAcumGA(ich)
+ 1)
                        End If
                    Next ich

                    'verifica se ocorre ou não excesso de precipitação
                    For ich = 1 To nChuva
                        If InfiltMaxGA(ich) < ChuvaIntGA(ich) Then
                            'existe excesso de precipitação
                            'sendo gerado escorrimento superficial
                            Pond(ich) = True
                        Else
                            'toda a precipitação é infiltrada
                            Pond(ich) = False
                        End If
                    Next ich

                    'identifica os intervalos em que se verifica
                    'excesso de precipitação
                    pondi(1) = False
                    pondi(nChuva) = False
                    For ich = 2 To nChuva - 1
                        If Pond(ich - 1) = True And Pond(ich) = True And Pond(ich + 1) = True Then
                            pondi(ich) = True
                        Else
                            pondi(ich) = False
                        End If
                    Next ich

                    'cálculo da infiltração acumulada
                    InfiltAcumGA(1) = 0
                    For ich = 2 To nChuva

                        If pondi(ich) = True Then
                        'verifica-se excesso de precipitação
                        'calcula a infiltração acumulada quando existe excesso de precipitação
                            Ft = InfiltAcumGA(ich - 1)
                            For i = 1 To 1000 'numero máximo de iteracções
                                Ftx = Ft1
```

```
                                        Ft1 = Ft + Ksolo(cs) * dtCh + PSIsolo(cs) * dTeta * Log((Ft1 +
PSIsolo(cs) * dTeta) / (Ft + PSIsolo(cs) * dTeta))
                                    If Abs((Ft1 - Ftx) / Ft1) < 0.000001 Then
                                        InfiltAcumGA(ich) = Ft1
                                        Exit For
                                    End If
                                Next i
                            Else
                                'toda a precipitação se infiltra
                                'não se verifica excesso de precipitação
                                InfiltAcumGA(ich) = InfiltAcumGA(ich - 1) + ChuvaDist(icel, ich)
                            End If
                        Next ich

                        'cálcula o excesso de precipitação acumulado
                        For ich = 1 To nChuva
                            If pondi(ich) = True Then
                                ExChuvaAcumGA(ich) = ChuvaAcumGA(ich) - InfiltAcumGA(ich)
                            Else
                                ExChuvaAcumGA(ich) = 0
                            End If
                        Next ich

                        'cálculo do excesso de precipitação
                        For ich = 2 To nChuva
                            If pondi(ich) = True Then
                                ExChuvaGA(icel, ich) = (ExChuvaAcumGA(ich) - ExChuvaAcumGA(ich - 1))
                            Else
                                ExChuvaGA(icel, ich) = 0
                            End If
                        Next ich

                    End If
            Next iy
        Next ix




End Sub

Public Sub CalculaExcessoChuvaGA()
'cálculo do excesso de precipitção recorrendo à
'equação de Green Ampt
'o excesso de precipitação é dado em mm/hora


'variáveis para o cálculo do excesso de chuva
'pelo método de GreenAmpt
    Dim ChuvaAcumGA() As Single       'chuva acumulada
    Dim ChuvaIntGA() As Single        'intencidade de precipitação
    Dim InfiltMaxGA() As Single       'taxa potencial maxima de infiltração
    Dim InfiltAcumGA() As Single      'infiltração acumulada
    Dim Pond() As Boolean             'verdadeiro se ocorrer excesso de precipitação
'    Dim pondi() As Boolean            'identifica os intervalos em que se verifica excesso de precipi.
    Dim ExChuvaAcumGA() As Single     'excesso de chuva acumulado

    Dim K As Single                   'conductividade hidráulica corrigida

    Dim Ft1 As Single           'variáveis para o cálculo por substituições
    Dim Ftx As Single           'sucessivas da eq. de Green Ampt
    Dim Ft As Single
    Dim i As Integer            'contagem das iteracções para a resolução
    Dim dTeta As Single         'variação do teor de humidade volumétrico
                                'da eq. de Green Ampt


    Dim icel As Integer         'contagem das células
    Dim ix As Integer           'contagem de coluna
    Dim iy As Integer           'contagem de linha
    Dim ich As Single           'contagem do intervalo de tempo

'classe de solo
    Dim cs As Integer           'identificação da classe de solo a que a
                                'célula corrente pertence
```

```
'intervalo de tempo
    Dim dtCh As Single          'incremento de tempo




    'ReDim ChuvaGA(Nx * Ny, nChuva) As Single

    ReDim ChuvaAcumGA(nChuva) As Single     'chuva acumulada
    ReDim ChuvaIntGA(nChuva) As Single      'intensidade de precipitação
    ReDim InfiltMaxGA(nChuva) As Single     'infiltração máxima
    ReDim InfiltAcumGA(nChuva) As Single    'infiltração acumulada
    ReDim Pond(nChuva) As Boolean
'    ReDim pondi(nChuva) As Boolean
    ReDim ExChuvaAcumGA(nChuva) As Single

    ReDim ExChuvaGA(Nx * Ny, nChuva)



    'nesta rotina a unidade de tempo é a hora
    'assim o valor do intervalo de tempo entre registos é a hora
    dtCh = dtChuva / 3600 'conversão de segundos para horas




    icel = 0
    For iy = 1 To Ny         'para todas as células
        For ix = 1 To Nx
            icel = icel + 1     'contagem do numero de célula


                    'com base na precipitação, cálcula a precipitação efectiva

                    cs = CInfilt(icel)        'classe de solo da célula corrente
                    If cs <> -1 Then

                        'calibração da conductividade hidráulica
                        K = Ksolo(cs)

                        'calcula a variação do teor de humidade
                        dTeta = (1 - SEsolo(cs)) * NEsolo(cs)


                        'chuva acumulada
                        ChuvaAcumGA(1) = ChuvaDist(icel, 1)
                        For ich = 2 To nChuva
                            ChuvaAcumGA(ich) = ChuvaAcumGA(ich - 1) + ChuvaDist(icel, ich)
                        Next ich

                        'intensidade de precipitação
                        For ich = 1 To nChuva
                            ChuvaIntGA(ich) = ChuvaDist(icel, ich) / dtCh
                        Next ich


                        'intensidade de infiltração potencial máxima
                        For ich = 1 To nChuva
                            If ich = 1 Then
                                InfiltMaxGA(ich) = 99999
                            Else
                                InfiltMaxGA(ich) = K * ((PSIsolo(cs) * dTeta) / ChuvaAcumGA(ich) + 1)
                            End If
                        Next ich


                        'verifica se ocorre ou não excesso de precipitação
                        For ich = 1 To nChuva
                            If InfiltMaxGA(ich) < ChuvaIntGA(ich) Then
                                'existe excesso de precipitação
                                'sendo gerado escorrimento superficial
                                Pond(ich) = True
                            Else
                                'toda a precipitação é infiltrada
```

```
                                Pond(ich) = False
                            End If
                        Next ich


                        'verifica se ocorre ou não excesso de precipitação
                        For ich = 1 To nChuva
                            If InfiltMaxGA(ich) < ChuvaIntGA(ich) Then
                                'existe excesso de precipitação
                                'sendo gerado escorrimento superficial
                                Pond(ich) = True
                            Else
                                'toda a precipitação é infiltrada
                                Pond(ich) = False
                            End If
                        Next ich


                        'cálculo da infiltração acumulada
                        InfiltAcumGA(1) = 0
                        For ich = 2 To nChuva

                            If Pond(ich) = True Then
                            'verifica, se existe excesso de precipitação
                            'calcula a infiltração acumulada quando existe excesso de precipitação
                                Ft = InfiltAcumGA(ich - 1)
                                For i = 1 To 1000 'numero máximo de iteracções
                                    Ftx = Ft1
                                     Ft1 = Ft + K * dtCh + PSIsolo(cs) * dTeta * Log((Ft1 + PSIsolo(cs) *
dTeta) / (Ft + PSIsolo(cs) * dTeta))
                                    If Abs((Ft1 - Ftx) / Ft1) < 0.000001 Then
                                        InfiltAcumGA(ich) = Ft1
                                        Exit For
                                    End If
                                    If i = 999 Then MsgBox "não convergiu"
                                Next i
                                'MsgBox "GA não convergio"
                            Else
                                'toda a precipitação se infiltra
                                'não se verifica excesso de precipitação
                                InfiltAcumGA(ich) = InfiltAcumGA(ich - 1) + ChuvaDist(icel, ich)
                            End If
                            InfiltMaxGA(ich) = (InfiltAcumGA(ich) - InfiltAcumGA(ich - 1)) / dtCh
                        Next ich




                        'cálculo do excesso de precipitação
                        For ich = 1 To nChuva
                            If Pond(ich) = True Then
                                ExChuvaGA(icel, ich) = (ChuvaIntGA(ich) - InfiltMaxGA(ich)) * dtCh
                                If ExChuvaGA(icel, ich) < 0 Then
                                    ExChuvaGA(icel, ich) = 0
                                End If
                            Else
                                ExChuvaGA(icel, ich) = 0
                            End If
                        Next ich

                    End If
                Next ix
            Next iy

        End Sub

        Public Sub CalculaExcessoChuvaSCS()
        'o resultado é dado em mm/hora

            Dim icel As Integer
            Dim ix As Integer
            Dim iy As Integer
            Dim ich As Integer

            Dim P As Single
            Dim CNi As Single
```

```
    Dim PSCS() As Single
    Dim PeSCS() As Single

    ReDim ExChuvaSCS(Nx * Ny, nChuva) As Single

'*********************************************
'gera uma chuva unitária de 1 cm
'    icel = 0
'   For iy = 1 To Ny
'        For ix = 1 To Nx
'            icel = icel + 1
'            If CInfilt(icel) <> -1 Then
'                For ich = 1 To nChuva
'                    ExChuvaSCS(icel, ich) = ChuvaDist(icel, ich)
'                Next ich
'            End If
'        Next ix
'    Next iy
'    Exit Sub
'*********************************************


    icel = 0
    For iy = 1 To Ny
        For ix = 1 To Nx
            icel = icel + 1


            ReDim PSCS(nChuva) As Single
            ReDim PeSCS(nChuva) As Single


            'calcula a chuva acumulada para a célula corrente
'           If ix > 50 And iy <= 30 Then
'            If ix <= 50 Then
               PSCS(1) = ChuvaDist(icel, 1)
               For ich = 2 To nChuva
                   PSCS(ich) = PSCS(ich - 1) + ChuvaDist(icel, ich)
               Next ich
'            End If


            If CInfilt(icel) <> -1 Then
                CNi = cn(CInfilt(icel))
                For ich = 1 To nChuva
                    P = PSCS(ich)
                    If (P - 5080 / CNi + 50.8) > 0 Then
                        PeSCS(ich) = ((P - 5080 / CNi + 50.8) ^ 2 / (P + 20320 / CNi - 203.2))
                    Else
                        PeSCS(ich) = 0
                    End If
                Next ich


                'calcula a chuva efectiva incremental
                ExChuvaSCS(icel, 1) = PeSCS(1)
                For ich = 2 To nChuva
                    ExChuvaSCS(icel, ich) = PeSCS(ich) - PeSCS(ich - 1)
                Next ich

            End If
        Next ix
    Next iy


End Sub
```

```
Public Sub GeraClassesDeInfilt(fileres As String)

'esta função preenche as classes de infiltração
'CInfilt com base em CSolos e CUsoSolo
Dim iCInf As Integer    'iteracção pelas classes de infiltração
Dim icel As Integer
Dim ix As Integer
Dim iy As Integer
Dim cs As Integer
Dim cus As Integer

Dim nova As Boolean
    ReDim CInfilt(Nx * Ny) As Integer

    ncInfilt = 0
    icel = 0
    For iy = 1 To Ny
        For ix = 1 To Nx
            icel = icel + 1

            cs = CSolos(icel)
            cus = CUsoSolo(icel)

            If cs <> -1 And cus <> -1 Then
                nova = True          'por defeito existe uma nova classe de inf



                For iCInf = 1 To ncInfilt
                    If cs = InfS(iCInf) And cus = InfUS(iCInf) Then
                        nova = False
                        CInfilt(icel) = iCInf
                    End If
                Next iCInf

                If nova = True Then
                    'temos uma nova classe de infiltração
                    ncInfilt = ncInfilt + 1
                    ReDim Preserve InfS(ncInfilt) As Integer
                    ReDim Preserve InfUS(ncInfilt) As Integer

                    InfS(ncInfilt) = cs
                    InfUS(ncInfilt) = cus

                    CInfilt(icel) = ncInfilt
                End If

            Else
                CInfilt(icel) = -1
            End If

        Next ix
    Next iy

    Open fileres For Output As #1
        icel = 0
        For iy = 1 To Ny
            For ix = 1 To Nx
                icel = icel + 1
                Print #1, CInfilt(icel); ",";
            Next ix
        Next iy
    Close #1

    Open (fileres + "Legenda.dat") For Output As #1
        Print #1, "Classe     Solo     UsoDoSolo"
        Print #1, "ncInfilt = "; ncInfilt
        For iCInf = 1 To ncInfilt
            Print #1, iCInf; "       "; InfS(iCInf); "        "; InfUS(iCInf)
        Next iCInf
    Close #1

End Sub

Public Function ExcessoDeChuvaGA(icel As Integer, t As Single)
't em segundos
```

```
            Dim it As Integer
            Dim fr As Single


            it = Int(t / dtChuva) + 1
            'fr = Frac(t / dtChuva)

            If it <= nChuva Then
        '          ExcessoDeChuvaGA = ExChuvaGA(icel, it) + ((ExChuvaGA(icel, it + 1) - ExChuvaGA(icel, it)) /
dtChuva) * (dtChuva - fr)
                 ExcessoDeChuvaGA = ExChuvaGA(icel, it)
            Else
                ExcessoDeChuvaGA = 0
            End If


        End Function

        Public Function ExcessoDeChuvaSCS(icel As Integer, t As Single)
        't em segundos

            Dim it As Integer
        '    Dim fr As Single


            it = Int(t / dtChuva) + 1
        '    fr = Frac(t / dtChuva)


            If it <= nChuva Then
                 'ExcessoDeChuvaSCS = ExChuvaSCS(icel, it) + ((ExChuvaSCS(icel, it + 1) - ExChuvaSCS(icel, it)) /
dtChuva) * (dtChuva - fr)
                ExcessoDeChuvaSCS = ExChuvaSCS(icel, it)
            Else
                ExcessoDeChuvaSCS = 0
            End If
        End Function

        Public Sub GravaResChuva(ficheiro As String)

            Dim icel As Integer
            Dim ix As Integer
            Dim iy As Integer

            Dim ich As Integer

            Open ficheiro For Output As #1

                Print #1, "       PROPRIEDADES DAS CLASSES DE INFILTRAÇÃO"
                Print #1, ""
                 Print #1, "iCel  CSOLO  CUSOSOLO  CINFILT    Nsolo    NEsolo    PSIsolo    Ksolo    SEsolo    |
AMC   GRUPO   CN"
                  Print #1, "       (ID)      (ID)      (ID)       (adim.)  (adim.)    (mm)    (mm/hora)  (adim.)
(ID)   (ID)   (%)"

                icel = 0
                For iy = 1 To Ny
                    For ix = 1 To Nx
                        icel = icel + 1

                        Print #1, icel;
                        Print #1, Format(CSolos(icel), "00"); "  ";
                        Print #1, Format(CUsoSolo(icel), "00"); "  ";
                        Print #1, Format(CInfilt(icel), "00"); "  ";
                        If CInfilt(icel) <> -1 Then
                            Print #1, Format(Nsolo(CInfilt(icel)), "000.000"); "  ";
                            Print #1, Format(NEsolo(CInfilt(icel)), "000.000"); "  ";
                            Print #1, Format(PSIsolo(CInfilt(icel)), "000.000"); "  ";
                            Print #1, Format(Ksolo(CInfilt(icel)), "000.000"); "  ";
                            Print #1, Format(SEsolo(CInfilt(icel)), "000.000"); "  ";
                            Print #1, "|";
                            Print #1, Format(amc(CInfilt(icel)), "0"); "  ";
                            Print #1, Format(SoloGrupo(CInfilt(icel)), "0"); "  ";
                            Print #1, Format(cn(CInfilt(icel)), "0")
                        Else
```

```
                Print #1, ""
            End If
        Next ix
    Next iy


    Print #1, ""
    Print #1, "        EXCESSO DE PRECIPITAÇÃO   "
    Print #1, ""

    Print #1, "icel     t     ChuvaDist    ExChuvaGA    ExChuvaSCS"
    Print #1, "        (s)       (mm)         (mm)         (mm)"

    icel = 0
    For iy = 1 To Ny
        For ix = 1 To Nx
            icel = icel + 1

            If CInfilt(icel) <> -1 Then
                Print #1, ""
                For ich = 1 To nChuva
                    Print #1, Format(icel, "0000"); "    ";
                    Print #1, Format((ich - 1) * dtChuva, "000000"); "    ";
                    Print #1, Format(ChuvaDist(icel, ich), "000.000"); "    ";
                    Print #1, Format(ExChuvaGA(icel, ich), "000.000"); "    ";
                    Print #1, Format(ExChuvaSCS(icel, ich), "000.000")
                Next ich
            End If
        Next ix
    Next iy

Close #1


End Sub

Public Sub LeClassesDeInfilt()

    Dim ix As Integer
    Dim iy As Integer

    Open fileClassesDeInfilt For Input As #1
            ReDim CInfilt(Nx * Ny) As Integer
            For iy = 1 To Ny
                For ix = 1 To Nx
                    Input #1, CInfilt(NNo(ix, iy))
                Next ix
            Next iy
    Close #1

    ncInfilt = CalculaNumClassesInfilt
End Sub

Public Sub LeClassesDeUsoDoSolo()


Dim iy As Integer
Dim ix As Integer


    'classes de uso do solo
    Open fileClassesDeUsoDoSolo For Input As #1
            ReDim CUsoSolo(Nx * Ny) As Integer
            For iy = 1 To Ny
                For ix = 1 To Nx
                    Input #1, CUsoSolo(NNo(ix, iy))
                Next ix
            Next iy
    Close #1


    ncUsoSolo = CalculaNumClassesUsoSolo
End Sub

Public Sub LeDadosChuva()
    Dim iEstac As Integer
```

```
    Dim ich As Integer

    'dados das estações meteorologicas e das chuvas
    Open fileChuva For Input As #1
        Input #1, nEstac
        Input #1, dtChuva
        Input #1, nChuva
        ReDim NomeEstac(nEstac) As String
        ReDim xEstac(nEstac) As Single
        ReDim yEstac(nEstac) As Single
        ReDim Chuva(nEstac, nChuva) As Single

        For iEstac = 1 To nEstac
            Input #1, NomeEstac(iEstac)
            Input #1, xEstac(iEstac), yEstac(iEstac)
            For ich = 1 To nChuva
                Input #1, Chuva(iEstac, ich)
            Next ich
        Next iEstac
    Close #1

End Sub

Sub LeClassesDeSolo()

Dim ix As Integer       'iteracção pela coluna
Dim iy As Integer       'iteracção pela linha

Dim ich As Integer      'variável de contagem
Dim ics As Integer      'contagem das classes de solo
Dim iEstac As Integer   'variável de contagem das estações meteorologicas

Dim dummy As Integer

    'classes de solo
    Open fileClassesDeSolo For Input As #1
            ReDim CSolos(Nx * Ny) As Integer
            For iy = 1 To Ny
                For ix = 1 To Nx
                    Input #1, CSolos(NNo(ix, iy))
                Next ix
            Next iy
    Close #1

    ncSolos = CalculaNumClassesSolos
End Sub



Public Sub LePropClassesInfiltSCS()
    Dim ics As Integer
    Dim dummy As Integer

    'propriedades das classes de infiltração do SCS
    Open filePropSolosSCS For Input As #1
        Input #1, ncInfiltSCS           'numero de classes de solo
        ReDim amc(ncInfiltSCS)             'antecedent moisture condition
        ReDim SoloGrupo(ncInfiltSCS)       'grupo de solo
        ReDim cn(ncInfiltSCS)              'curva numero
        For ics = 1 To ncInfiltSCS         'para todas as classes de solos
            Input #1, dummy
            Input #1, amc(ics)          'porosidade
            Input #1, SoloGrupo(ics)    'porosidade efectiva
            Input #1, cn(ics)           'curva numero
        Next ics
    Close #1


End Sub


Public Sub LePropClassesInfiltGA()

Dim ics As Integer
Dim dummy As Integer
```

```
    'propriedades das classes de infiltração (green ampt)
    Open filePropSolosGA For Input As #1
        Input #1, ncInfiltGA         'numero de classes de solo
        ReDim Nsolo(ncInfiltGA)        'porosidade
        ReDim NEsolo(ncInfiltGA)       'porosidade efectiva
        ReDim PSIsolo(ncInfiltGA)      'altura de sucção
        ReDim Ksolo(ncInfiltGA)        'conductividade hidráulica
        ReDim SEsolo(ncInfiltGA)       'saturação efectiva
        For ics = 1 To ncInfiltGA      'para todas as classes de solos
            Input #1, dummy
            Input #1, Nsolo(ics)      'porosidade
            Input #1, NEsolo(ics)     'porosidade efectiva
            Input #1, PSIsolo(ics)    'altura de sucção
            Input #1, Ksolo(ics)      'conductividade hidraulica
            Input #1, SEsolo(ics)     'saturação efectiva inicial do solo
        Next ics
    Close #1


End Sub


Public Function AlturaDeSuccao(icel As Integer) As Single
    AlturaDeSuccao = PSIsolo(CInfilt(icel))
End Function


Public Function SaturacaoEfectiva(icel As Integer) As Single
    SaturacaoEfectiva = SEsolo(CInfilt(icel))
End Function


Public Function TipoDeSoloSCS(icel As Integer) As Integer
    TipoDeSoloSCS = SoloGrupo(CInfilt(icel))
End Function
```